

乔建伟, 夏玉云, 郑建国, 等. 黄土湿陷地裂缝发育特征与成因机理研究[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 71–76. [QIAO Jianwei, ZHENG Jianguo, LU Quanzhong, et al. Research on Development Characteristics and Formation Mechanisms of Collapsible Earth Fissure[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 71–76. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.014.]

黄土湿陷地裂缝发育特征与成因机理研究^{*}

乔建伟^{1,2}, 夏玉云^{1,2}, 郑建国^{1,2}, 卢全中³, 刘争宏^{1,2,3}, 王俊茂^{1,2}

(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. 长安大学 地质工程系, 陕西 西安 710043)

摘要: 通过一系列地质调查研究了黄土湿陷地裂缝的发育特征, 结合浸水试验分析了地裂缝的成因机理和形成过程。研究结果表明: 黄土湿陷地裂缝与浸水坑平行, 兼具水平拉张和竖直位错, 地裂缝发展演化过程可分为四个阶段。黄土湿陷地裂缝上宽下窄, 其宽度和竖直位移均随深度增加而减小, 地裂缝发育深度约等于黄土湿陷土层厚度。黄土渗透浸润线与竖直面的夹角随时间逐渐增加, 导致湿陷地裂缝逐渐向外扩展。黄土湿陷产生的差异沉降和拉张应变是湿陷地裂缝形成的直接因素, 当地面倾斜率达到0.6%, 拉应变达到0.002%时, 地裂缝出露地表。基于悬臂梁理论提出了湿陷差异沉降产生拉张应力的计算公式, 根据本公式可预测黄土湿陷地裂缝的发育位置。

关键词: 湿陷地裂缝; 浸润线; 发育特征; 成因机理; 黄土

中图分类号: P642; TU471; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)03–0071–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.014

地裂缝是一种由地球内外动力以及人类活动营力耦合作用下形成的线性地质灾害, 具有在地表张开成缝而破坏沿线地质体和建筑物的典型特征^[1–4]。自20世纪50年代西安出现第一条地裂缝以来, 地裂缝已成为我国主要的地质灾害之一, 至2015年已在全国28个省市的4 000余处发现地裂缝5 000余条, 其主要分布在我国的中东部地区, 如河北平原、汾渭盆地和苏锡常地区^[5–9]。

自地裂缝出现以来, 我国众多学者就对其发育特征和成因机理开展了大量研究, 发现不同地区地裂缝发育特征与成因机理相差较大。如彭建兵研究团队通过大量的野外调查、地质测绘、地质勘探、数值模拟和模型试验等对大华北地区地裂缝开展了系统研究, 发现地裂缝主要发育在地面沉降较为严重的断裂沿线、常与地面沉降相伴生、平行于断裂走向、延伸较长且规模大, 地裂缝兼具水平拉张、垂直位错和水平扭转, 地裂缝多是断裂活动和超采地下水的耦合作用结果^[10–18]。许多学者通过现场调查、地面沉降监测、地质勘探和数值模拟等方法对苏锡常地区地裂缝开展了大量研究, 发现地裂缝主要分布在地面沉降边缘、

地裂缝走向不稳定、地裂缝平行于地面沉降等值线, 地裂缝地表活动以水平拉张变形为主、部分地裂缝兼具一定的竖向位错, 地裂缝主要是超采地下水引发地面差异沉降的结果^[19–26]。

综上, 目前我国关于地裂缝的成因机理研究多与超采地下水引起的地面沉降有关。然而, 随着西部大开发的持续推进, 我国黄土地区由于水渠渗漏和水坑积水引起地下水位抬升而产生了大量的黄土湿陷地裂缝, 其导致农田荒废、电站废弃、铁路路基下沉、门窗变形、房屋墙体开裂等, 已成为黄土地区的主要地质灾害之一, 严重阻碍西北地区的城市化进程。这些地裂缝一般延伸长度和发育深度有限, 与断裂蠕滑和抽取地下水诱发地裂缝具有明显的差异性。我国对黄土湿陷地裂缝已开展了部分研究, 如LI^[27]通过研究山西地堑系地裂缝成因机理, 首次提出黄土湿陷是地裂缝的诱发因素之一; 随后众多学者通过室内试验、现场调查和数值模拟研究了不同地区黄土湿陷性地裂缝的成因机理, 均认为黄土湿陷变形是黄土地区地裂缝发育的主要因素^[28–31]。但是, 目前尚缺少对黄土湿陷性地裂缝基本特征和成因机理的

* 收稿日期: 2020–11–19 修回日期: 2021–03–03

基金项目: CMEC 科技孵化项目(CMEC–KJFH–2018–02); CMEC2016年科技研发基金项目资助(CMEC–KJYF–2016–06); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KT2B03–02); 国机集团科技发展基金(SINOMACH09); 陕西省“三秦学者”创新团队支持计划资助(2013KCT–13); 国家自然科学资金项目(41877250); 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010; 2019C0011)

第一作者简介: 乔建伟(1990–), 男, 汉族, 安徽砀山人, 博士, 主要从事地质灾害成因机理方面的研究工作. E-mail: qiaojw@jk.com.cn
通讯作者: 夏玉云(1968–), 男, 汉族, 陕西定边人, 教授级高级工程师, 主要从事工程地质和地基基础方面的研究工作.

E-mail: xiayy@jk.com.cn

系统研究。鉴于此,本文在详细研究西白村地裂缝的基础上,结合试坑浸水试验对黄土湿陷地裂缝的发育特征和成因机理开展了专项研究,研究结果可为黄土地区地裂缝防灾减灾提供科学依据和技术支撑。

1 西白村地裂缝和布里村浸水试验概况

1.1 西白村地裂缝概况

西白村地裂缝位于渭南市澄城县西白村南侧,地貌单元为黄土台塬(图1),地表50 m以下地层主要为马兰黄土、古土壤和离石黄土。该地裂缝最早于2007年6月强降雨以后出现在水坑两侧10 m处,表现为两侧差异沉降明显,随后地裂缝不仅逐渐沿裂缝走向向两侧扩展延伸,还不断沿垂直裂缝走向向水渠外侧扩展,表现为地裂缝的长度和影响面积逐年增加,至2017年6月野外调查时,该地裂缝已发展为累计延伸长度约800 m,影响面积约3.2 km²的地裂缝带(图2)。地裂缝位于水坑两侧并与水坑平行,在地表表现为地裂沟、塌陷坑和陡坎,陡坎高度一般为10~40 cm,地裂缝所包围的区域出现明显沉降,最大沉降量约60 cm;地裂缝每年在4至8月期间活动强烈,特别是在强降雨和灌溉以后活动速率增强;地裂缝造成沿线农田荒废、铁路路基下降,因地裂缝影响,仅维修沿线铁路费用已累计达上百万元,农业经济损失达数十万元,给沿线农民造成了严重的经济损失。

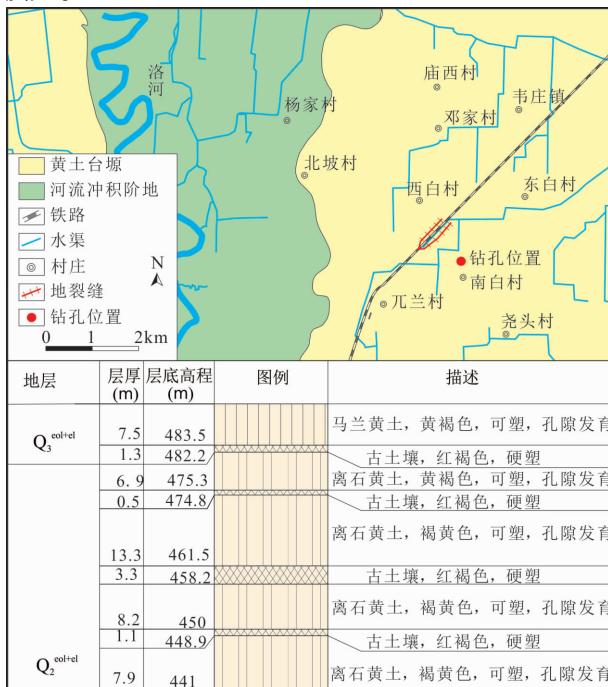


图1 西白村地裂缝地质概况

1.2 布里村试坑浸水试验概况

试坑浸水场地位于咸阳市渭城区布里村,地貌单元为渭河盆地北侧的泾阳南塬(图3)。探井揭

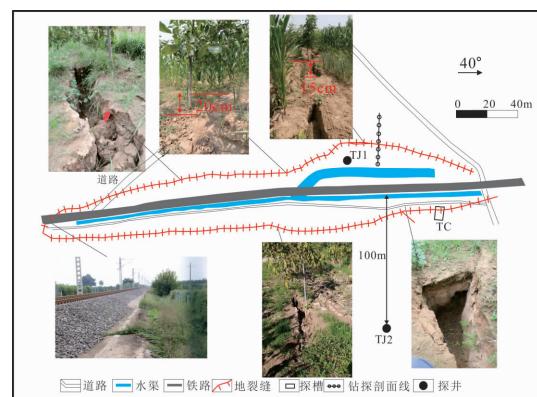


图2 西白村地裂缝平面分布图及勘探平面布置

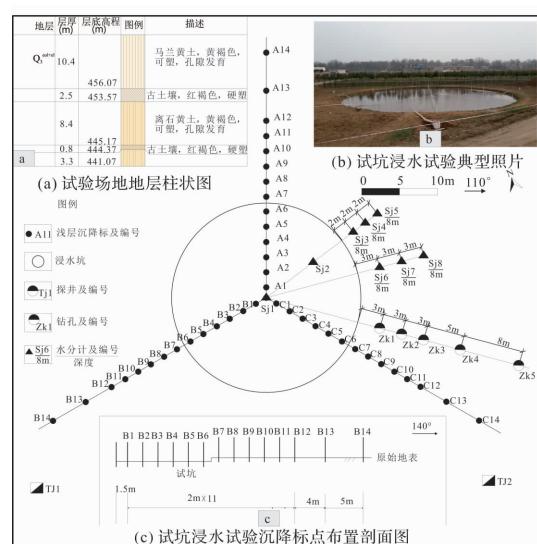


图3 布里村试坑浸水试验布置图

示地面以下25 m发育的地层依次为马兰黄土、古土壤、离石黄土和古土壤(图3a)。试坑深0.5 m,直径25 m,试坑底部铺设10 cm厚的圆砾,圆砾粒径为1~3 cm,试验时保持试坑内水头位于坑底以上30~40 cm(图3b)。试验共布设沉降观测标点43个,其中1个标点布置在试坑中心,其余42个标点平均布置为3条测线,测线之间夹角为120°,每条测线试坑内布设6个测点,第一个测点与圆心距离为1.5 m,之后每两个测点的间距为2 m。每条测线坑外布设8个测点,第一个测点距试坑边缘1 m,之后5个测点间距均为2 m,而最外侧两个测点分别距坑边15 m和20 m(图3c),试验浸水后每天进行沉降监测,累计浸水48 d,停止浸水后又持续监测沉降21 d。在试坑内布置两组水分计用来测试土体含水量变化,每组埋设5个,埋设深度分别为5 m、10 m、15 m、20 m和25 m;此外,还在试坑外侧8 m和16 m深度处还布置两排水分计用来测试试验过程中的土体含水量变化(图3);试验开始前,在试验场地开挖探井并取样测试土体初始含水量,试验浸水完成后在试坑外侧布设一条钻探剖面,取土测试其含水量并与初始含水量对比,从而确定水平浸润范围。

2 湿陷地裂缝的发育特征

2.1 湿陷地裂缝的平面展布特征和发展过程

试坑浸水期间, 试坑周围累计出露6条环形裂缝, 即 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 和 f_6 (图4), 其中 $f_1\sim f_5$ 均为闭合裂缝, 而 f_6 未闭合。地裂缝走向与试坑平行, 分布在距试坑水平距离1~16 m内。地裂缝均表现出水平拉张和垂直位错, 且均是靠近试坑一侧下沉。裂缝出露地表时首先表现为水平拉张, 随后开始出现垂直位错, 随时间增加水平位移和垂直位错逐渐增加, 但在裂缝的宽度和位错量增加至一定值后又开始减小并逐渐趋于闭合, 因此, 黄土湿陷地裂缝的发展过程可分为破裂形成—变形发展—变形减小—消亡闭合四个阶段。以 f_1 地裂缝为例, 地裂缝的发展过程为: 浸水后第5 d, 在试坑东南侧(B测线)距试坑1~3 m范围内出露长度约30 m, 宽度1~2 mm的 f_1 裂缝; 第6 d时 f_1 裂缝宽度增大为3~10 mm, 并开始出现错台, 位错量1~3 mm, 且裂缝延伸至试坑西北侧(测线A); 第7 d时 f_1 裂缝贯通成圆形, 且宽度增加至5~30 mm, 位错量增加至3~10 mm; 此后 f_1 裂缝宽度和位错量开始减小, 到浸水第10 d时基本闭合。

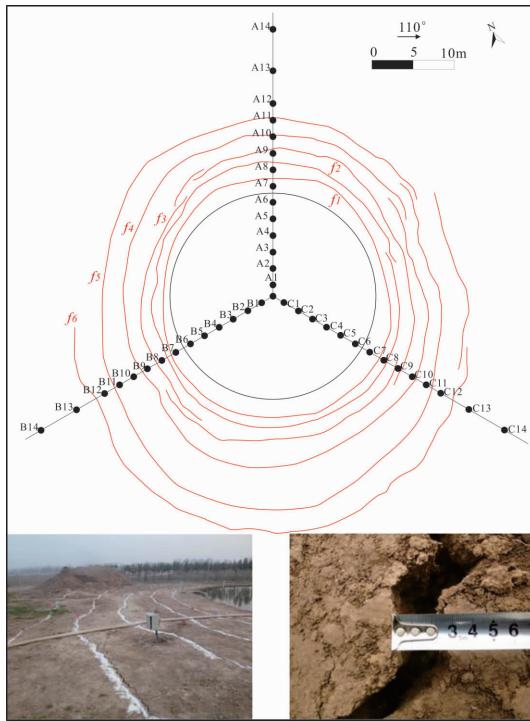


图4 试坑周边地裂缝分布图

2.2 湿陷地裂缝的剖面结构特征和发育深度

为了揭示湿陷地裂缝的剖面特征, 垂直西白村地裂缝走向布置长20 m、宽10 m、深10 m探槽(图2)。探槽结果(图5)表明地裂缝宽度上宽下窄, 为典型的“漏斗”状结构, 如裂缝在地表处最宽约50 cm, 向下延伸至2.2 m处宽度减小至1 cm, 裂缝内填充有机质、碳屑和粉质粘土, 填充



图5 西白村地裂缝剖面结构图

物含水量明显高于两侧土体含水量。此外, 地裂缝位错量随深度增加也逐渐减小, 如地表处裂缝位错量为22 cm, 延伸至马兰黄土顶部(深7.8 m)位错量变为0 cm, 且地裂缝延伸至8.2 m(马兰黄土底部)处尖灭。因此湿陷性地裂缝的宽度和位错量均随深度增加而减小, 且地裂缝发育深度约等于湿陷黄土土层厚度, 与构造型地裂缝具有显著差异性。

3 湿陷地裂缝的成因机理分析

3.1 黄土浸润范围与地裂缝

根据浸水试验水分计监测结果和钻孔含水量测试结果绘制浸水范围变化图(图6), 从图6可知黄土浸润范围随时间增加不仅逐渐向下发展, 还逐渐向试坑外侧发展, 即浸润线与竖直面夹角逐渐增加。同时, 地裂缝的发育位置也随时间增加而向试坑外侧扩展, 因此地裂缝的发育位置与水平浸润范围呈正相关关系。为了进一步确定浸润范围与地裂缝的关系, 垂直西白村地裂缝布置10个钻孔, 每个钻孔按深度方向间隔0.5 m现场取样并测试其含水量, 将其结果绘制成含水量等值线图(图7)。从图7可知同一深度土体含水量随与水坑距离的增加而减小, 水坑外侧32.5 m以外土体含水量变化较小, 表明水坑的水平浸润最远距离约为32.5 m; 浸润线在水坑外0~26 m为水平线, 在26 m处开始向下倾斜, 而地裂缝发育位置则位于浸润线与马兰黄土交界处的上部。

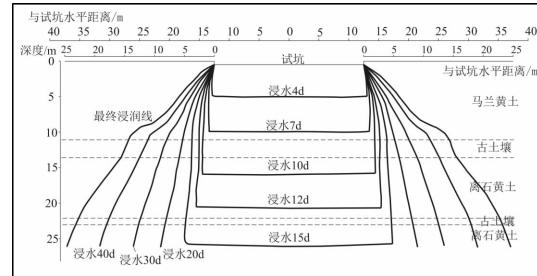
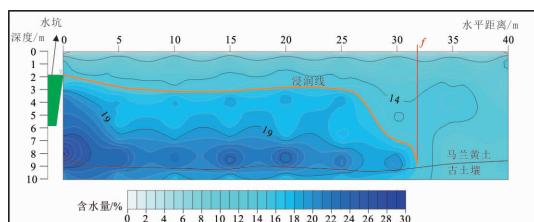


图6 黄土浸润线随时间变化曲线

3.2 黄土湿陷变形与地裂缝

试验期间地裂缝均是先在东南侧(测线B)附近出露, 1~2 d又在西北侧(A)出露, 2~6 d后裂缝贯通形成环形裂缝。将地裂缝出现时间及其对



和成因机理, 得出的主要结论如下:

(1) 黄土湿陷地裂缝平面形状受水坑形状控制, 其地表破裂特征兼具水平拉张和垂直位错, 地裂缝的发展演化过程可分为四个阶段: 破裂形成阶段—变形发展阶段—变形减小阶段—闭合消亡阶段。

(2) 黄土湿陷地裂缝水平拉张位移和垂直位错量随着深度增加逐渐减小, 剖面结构特征表现为“漏斗状”结构, 地裂缝的发育深度约等于湿陷黄土层厚度。

(3) 水平浸润线与竖直面夹角随时间增加逐渐增加, 湿陷地裂缝的发育位置也随时间增加向外扩展, 湿陷地裂缝的发育位置受浸润范围控制。

(4) 黄土湿陷产生的差异沉降和拉张应变是湿陷地裂缝形成的直接因素, 当地面倾斜率达到0.6%, 拉应变达到0.002%时, 地面土体破裂形成地裂缝。

基于悬臂梁理论提出了湿陷差异沉降产生拉张应力的计算公式为 $\sigma_t = \frac{(2h_1 + h_0)\gamma s^2}{h_1^2}$, 根据本公式可预测黄土湿陷地裂缝的发育位置。

参考文献

- [1] 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.
- [2] QIAO J W, PENG J B, DENG Y H, et al. Earth fissures in Qin-glong Graben in Yuncheng Basin, China [J]. Journal of Earth System Science, 2018, 127: 10.
- [3] 万佳威, 李滨, 谭成轩, 等. 中国地裂缝的发育特征及成因机制研究[J]. 地质论评, 2019, 65(6): 1383–1396.
- [4] 乔建伟, 彭建兵, 卢全中. 运城盆地尉郭地裂缝基本特征与成因分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(6): 110–119.
- [5] 耿大玉, 李忠生. 2000. 中美两国的地裂缝灾害[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 433–441.
- [6] PENG J B, QIAO J W, LENG Y Q, et al. Distribution and mechanism of the ground fissure in Wei River Basin, the origin of Silk Road [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 718.
- [7] 乔建伟. 基于地球关键带理论的渭北台塬地裂缝成因机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [8] 乔建伟, 彭建兵, 郑建国, 等. 中国地裂缝发育规律与运动特征研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1016–1027.
- [9] PENG J B, QIAO J W, SUN X H, et al. Distribution and generative mechanisms of ground fissures in China [J]. Journal of Asian Earth Science, 2020, 191: 104218.
- [10] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 433–440.
- [11] 彭建兵, 陈利伟, 黄强兵, 等. 地裂缝扩展的大型物理模型试验[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1826–1834.
- [12] 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.
- [13] 彭建兵, 卢全中, 黄强兵, 等. 汾渭盆地地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [14] PENG J B, SUN X H, WANG W, et al. Characteristics of land subsidence, earth fissures and related disaster chain effects with respect to urban hazards in Xi'an, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 1190.
- [15] PENG J B, XU J S, MA R Y, et al. Characteristics and mechanism of the Longyao ground fissure on North China Plain, China [J]. Engineering Geology, 2016, 214: 136–146.
- [16] PENG J B, MENG L C, LU Q Z, et al. Development characteristics and mechanisms of the Taigu–Qixian earth fissure group in the Taiyuan basin, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(11): 407.
- [17] PENG J B, WANG F Y, CHENG Y X, et al. Characteristics and mechanism of Sanyuan ground fissures in the Weihe Basin, China [J]. Engineering Geology, 2018, 247: 48–57.
- [18] PENG J B, SUN X H, LU Q Z, et al. Characteristics and mechanisms for origin of earth fissures in Fenwei basin, China [J]. Engineering Geology, 2020, 266: 105445.
- [19] WANG G Y, YOU G, SHI B, et al. Earth fissures triggered by groundwater withdrawal and coupled by geological structures in Jiangsu Province, China [J]. Environmental Geology, 2008, 57(5): 1047–1054.
- [20] WANG G Y, YOU G, SHI B, et al. Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China [J]. Engineering Geology, 2009, 104(1/2): 109–118.
- [21] WANG G Y, YOU G, SHI B, et al. Earth fissures in Jiangsu Province, China and geological investigation of Hetang earth fissure [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(1): 35–43.
- [22] WANG G Y, YOU G, ZHU J Q, et al. Investigations of Changjing earth fissures, Jiangyin, Jiangsu, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 502.
- [23] WANG G Y, YOU G, ZHU J Q, et al. Earth fissures in Su–Xi–Chang Region, Jiangsu, China [J]. Surveys in Geophysics, 2016, 37(6): 1095–1116.
- [24] YE S J, XUE Y Q, WU J C, et al. Progression and mitigation of land subsidence in China [J]. Hydrogeology Journal, 2015, 24(3): 685–693.
- [25] ZHANG Y, WANG Z C, XUE Y Q, et al. Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su–Xi–Chang area, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(2): 745–760.
- [26] ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, et al. Excessive groundwater withdrawal and resultant land subsidence in the Su–Xi–Chang area, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1135–1143.
- [27] LI Y L, YANG J C, HU X M. Origin of ground fissures in the Shanxi Graben System, Northern China. Engineering Geology, 2000, 55, 267–275.
- [28] SUN P, PENG J B, CHEN L W, et al. Weak tensile characteristics of loess in China—An important reason for ground fissures [J]. Engineering Geology, 2019, 108: 153–159.
- [29] ZANG M, PENG J B, QI S W. Earth fissures developed within collapsible loess area caused by groundwater uplift in Weihe watershed, northwestern China [J]. Journal of Asian Science, 2019, 173: 364–373.
- [30] LU Q Z, QIAO J W, PENG J B, et al. A typical earth fissure resulting from loess collapse on the loess plateau in the Weihe Basin, China [J]. Engineering Geological, 2019, 259: 1–9.
- [31] 汪丽, 李新生, 李同录. 隐伏裂缝扩展的大型原位浸水试验研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(3): 412–420.
- [32] JACHENS R C, HOLZER T L. Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona [J]. Geological Society of America Bulletin, 1982, 93(10): 998–1012.

Research on Development Characteristics and Formation Mechanisms of Collapsible Earth Fissure

QIAO Jianwei^{1,2}, ZHENG Jianguo^{1,2}, LU Quanzhong³, LIU Zhenghong^{1,2,3},
WANG Junmao^{1,2} and JIANG Menglin¹

(1. China JK Institute of Engineering and Design, Xi'an 710043, China;
2. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, China;
3. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: A series of geological investigations are used to reveal the development characteristics of collapsible earth fissure. Combined with in-situ water immersion test, the formation mechanism and process of earth fissure are analyzed. The results show that: The collapsible earth fissure possesses both horizontal tension and vertical dislocation, and it is parallel to water pit. The development and evolution of collapsible earth fissure can be divided into four stages. The width and vertical dislocation of the collapsible earth fissure decrease with the increasing depth. The depth of the earth fissure is about equal to the thickness of the loess collapsible soil layer. The angle between the seepage line and the vertical plane increases gradually with time, which leads to the development position of collapsible earth fissure expanding outwards. The differential settlement and tensile strain caused by loess collapse are the direct factors of collapsible earth fissure formation. When ground inclination reaches to 0.6% and the tensile strain reaches to 0.002%, the collapsible earth fissure is generated on earth surface. Based on the theory of cantilever beam, the calculation formula of tensile stress produced by differential settlement of collapsible soil is put forward. According to the calculation formula, the development position of collapsible earth fissure can be predicted.

Key words: collapsible earth fissure; seepage line; development characteristics; formation mechanism; loess

(上接第 70 页)

- | | |
|--|---|
| [17] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006(9): 1070–1075. | [19] GB/T51336 – 2018. 地下结构抗震设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. |
| [18] GB50909 – 2014. 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. | [20] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007(12): 31–37. |

Seismic Response of Underground Utility Tunnel Based on Equivalent Linear Viscoelastic Model of Soil

LI Jinkui^{1,2}, WANG Yang¹, YANG Chengyuan¹ and ZHUANG Wen¹

(1. The Architecture and Engineering of Dalian University, Dalian 116000, China;
2. Dalian Tunnel and Underground Engineering Center, Dalian 116000, China)

Abstract: Taking the underground utility tunnel project in Lvshun New Area of Dalian as the research background, a three-dimensional finite element model is established by using ABAQUS finite element software. The three-dimensional solid full integral element is used for the soil and the utility tunnel structure, and the equivalent linear viscoelastic model is used to simulate the dynamic nonlinear characteristics of soil, the linear elastic model is used to simulate the utility tunnel structure. In the numerical simulation, the soil-structure interaction is considered, the viscoelastic boundaries are set around and the bottom of the model. The ground motion is input in the form of equivalent nodal force. The structural response of the utility tunnel under four different ground motion intensities horizontal direction (X direction) of the Kobe seismic wave is studied. The results show that: ① The stress, displacement, and relative displacement of the utility tunnel in the during and the post earthquake all increase with the increase of the ground motion intensity. During the earthquake, the maximum stress and displacement of the utility tunnel are 1.545 MPa and 0.034 95 m at 0.05 g, 3.061 MPa and 0.068 57 m at 0.10 g, 4.599 MPa and 0.103 23 m at 0.15 g, and increase to 5.572 MPa and 0.135 45 m at 0.20 g. ② The stress ratio and displacement ratio of the utility tunnel in the during and the post earthquake indicate that the soil has a greater irrecoverable deformation during a major earthquake, and it also shows that the seismic damage of underground structures such as utility tunnel is mainly caused by soil deformation. ③ The upper end and lower end of the middle partition wall of the utility tunnel are the weak seismic positions of the utility tunnel. In the seismic design of the utility tunnel, effective measures should be taken to improve the seismic performance of these parts.

Key words: equivalent linear viscoelastic model; underground utility tunnel; soil-structure interaction; viscoelastic boundary; seismic response