

基于物理模拟试验的黄土高填方场地裂缝发育过程分析

曹静远, 郑建国, 于永堂, 曹杰

Analysis of crack development in loess deep filled ground based on physical modelling tests

CAO Jingyuan, ZHENG Jianguo, YU Yongtang, and CAO Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律

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

于永堂, 郑建国, 张继文, 刘智 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 85-92

黄土高填方场地工后沉降预测模型性能评估方法

Evaluation methods for performance of post-construction settlement prediction models in thick loess filled ground

于永堂, 郑建国, 孙荣, 黄鑫, 韩文斌 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 39-48

探地雷达在湿陷性黄土挖填方高边坡土体性状探测中的应用

Application of the ground-penetrating radar technology in detection of soil properties of the high cutting and filling slopes in collapsible loess area

王韵, 王红雨, 李其星, 亢文涛 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 102-110

降雨作用下古滑坡复活机理物理模拟试验研究

Experimental study on physical simulation of reactivation mechanism of ancient landslides under rainfall condition

王立朝, 任三绍, 李金秋 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 21-31

西安典型地裂缝场地地脉动测试及地震响应特征分析

Ground pulsation tests and analysis on seismic response of typical ground fissure sites in Xi'an

王晗, 邓亚虹, 慕焕东, 薛捷 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 55-64

基于InSAR监测和PSO-SVR模型的高填方区沉降预测

Subsidence prediction of high-fill areas based on InSAR monitoring data and the PSO-SVR model

李华蓉, 戴双, 郑嘉欣 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 127-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310022

曹静远, 郑建国, 于永堂, 等. 基于物理模拟试验的黄土高填方场地裂缝发育过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 128-136.

CAO Jingyuan, ZHENG Jianguo, YU Yongtang, et al. Analysis of crack development in loess deep filled ground based on physical modelling tests[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 128-136.

基于物理模拟试验的黄土高填方场地裂缝发育过程分析

曹静远¹, 郑建国^{1,2}, 于永堂^{1,3}, 曹杰²

- (1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 机械工业勘察设计研究院有限公司陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710021;
3. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 裂缝是高填方工程中常见病害, 常规手段难以精准预测裂缝的发育情况。为指导黄土高填方工程的抗裂缝设计, 以陕北某黄土高填方工程中的典型沟谷断面为原型, 采用土工离心模型试验预测黄土高填方场地潜在裂缝, 结合现场监测方法, 揭示裂缝产生机制, 并调查分析工程场地内裂缝的孕裂环境、启裂条件、破裂过程, 评估离心模型试验预测裂缝发育的有效性, 提出适用于黄土高填方场地的裂缝防控措施。离心模型试验结果显示, 不均匀沉降、水平位移会引起沟谷地形中的黄土高填方场地在挖填交界带内发育裂缝; 离心模型试验与原型现场监测结果显示, 原型与离心模型试验的裂缝分布位置相对应, 填土厚度差异引起的不均匀沉降和朝向沟谷中心的水平位移产生的拉剪联合作用是裂缝产生的主要原因。

关键词: 黄土; 高填方; 裂缝; 离心模型试验; 原位观测

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2024)06-0128-09

Analysis of crack development in loess deep filled ground based on physical modelling tests

CAO Jingyuan¹, ZHENG Jianguo^{1,2}, YU Yongtang^{1,3}, CAO Jie²

- (1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Behavior and Treatment for Special Rocks and Soils, China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Cracks are a common issue in deep filled construction projects, and conventional methods often struggle to accurately predict their development. To guide the anti-crack design for deep-filled loess projects, a prototype of a typical gully section from a northern Shaanxi project was selected. Geotechnical centrifuge model tests were utilized to predict potential cracks in the loess fill, with the cracking mechanisms elucidated through combined field monitoring. The study also investigates the conditions conducive to cracking, the fracture initiation of cracks, and the fracture processes within the project site. The

收稿日期: 2023-10-18; 修订日期: 2023-12-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-086); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-499); 西安市秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(23KGDW0025-2023); 国家自然科学基金项目(42072302)

第一作者: 曹静远(1998—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要从事湿陷性土地基处理技术研究。E-mail: caojingyuanchn@163.com

effectiveness of using centrifuge model tests for predicting crack development was evaluated, and measures suitable for preventing and controlling cracks in high loess fill sites were proposed. The results indicate that uneven settlement and horizontal displacement cause cracks to develop in the excavation-fill boundary zone within gully terrain. Both centrifuge model tests and prototype field monitoring demonstrate that crack distributions in the prototype correspond to those in the tests, with differential fill thickness and horizontal displacement towards the center of the gully primarily responsible for the formation of cracks.

Keywords: loess; deep filled ground; cracks; centrifuge model test; field monitoring

0 引言

我国西部黄土丘陵沟壑区的城镇为扩大工程建设用地面积,采取“削岭填沟”方式造地,形成了大量黄土高填方工程。黄土高填方工程的场地范围大,常常跨越不同地质、地貌单元,原始场地地形起伏、岩土软硬程度不均且地质条件复杂,加上填土厚度受地形影响存在差异,土方填筑完成后往往在场地内出现裂缝。由于裂缝发育范围内的土体结构松散,具有较大孔隙,当降水汇聚形成地表径流沿裂缝入渗时,裂缝带容易形成侵蚀沟或低洼地带,而这些负地形又会形成优势入渗通道或聚集地表水^[1-3]。当地表水通过裂缝下渗时,会使裂缝带范围内土体产生一系列复杂的物理和化学变化作用,包括潜蚀、湿陷和软化等,进一步加剧裂缝发育,使地表产生不均匀沉降^[4]。若不及时处理,会造成地面设施的差异变形和开裂破坏,构成工程安全隐患^[5]。

国内外对填方场地裂缝的研究则主要集中在填方边坡、路基和土石坝上。国内许多学者对填方边坡进行了现场调查、原位监测和室内模型试验等方法,对填方边坡的变形和裂缝发育进行了研究,并对不同类型的裂缝和其成因、演化特征与破坏模式等进行分析^[6-9];俞清荣^[10]认为高填方路基自身填筑土石方量大,填筑材料、施工工艺、水文地质及重载车辆等都可造成路基的横向不均匀沉降和变形,最终引起路基出现纵向裂缝,并提出通过地基处理、沉降观测及选择路面施工时间等方法以避免产生纵向裂缝;Sherard等^[11]对多个处理土石坝开裂的工程进行调查,分析不同类型土石坝裂缝的成因,并给出预防裂缝出现的处理措施。在黄土高填方场地裂缝的研究方面,Wang等^[12]对黄土高填方边坡的变形和破坏机理进行研究,认为强夯和填土厚度的不均匀使不同位置填土的力学性质出现差异,致使填土发生工后差异沉降,最终导致黄土高填方边坡表面形成裂缝。目前国内外对填方场地裂缝的研究相对匮乏,针对大面积黄土高填方场地裂缝的研究则更少。因此,分析黄土高填方场地裂缝的成因、探讨其发生和发展的机

制、研究裂缝的预测方法和防治措施,无疑是黄土高填方工程的重要研究课题。

黄土高填方场地裂缝的影响因素复杂,常规的高填方设计方法无法精确预测潜在开裂位置。物理模型试验可在一定范围内模拟土工问题,为工程设计提供参数和科学依据,再加上现场的原型观测资料,大部分土工问题都可以得到有效解决。土工离心模型试验是重要的物理模型试验手段,可利用离心力模拟原型的自重应力,在较短的时间内再现原型特征。为此,国内外不少学者将土工离心机模型试验用于基岩断裂引起上覆土裂缝^[13],堤防和土石坝变形裂缝^[14-18]的研究,用于验证工程设计计算方法以及本构关系数学模型所得结果的可靠性。可见,将土工离心模型试验用于预估黄土高填方场地裂缝的发育,具有较好的应用前景和潜力。

本文以陕北某黄土高填方工程的典型断面为原型,采用离心模型试验方法研究黄土高填方场地裂缝产生机制,并与现场裂缝观测结果进行对比分析,评估离心模型试验模拟裂缝的有效性,最后提出适用于黄土高填方场地的裂缝防控措施。研究成果可为黄土高填方工程裂缝的预防和处理提供参考。

1 原型概况

陕北某黄土高填方工程一期规划范围南北方向长度约 5.5 km,东西方向宽度约 2.0 km,挖方总量约为 $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,填方总量约为 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大挖方厚度约为 118 m,最大填方厚度约为 112 m。本工程场地内存在主沟和多条支沟,各沟谷呈“U”形、“V”形发育,黄土覆盖于起伏不平的基岩顶面之上,并承袭了下伏基岩的古地形特征。

本次离心模型试验模拟剖面位于原型工程主沟下游位置,地质剖面如图 1 所示。由图可知,原场地沟谷区土层为第四系全新统冲、洪积层($\text{Qh}_4^{\text{al+pl}}$),梁峁区土层为第四系上更新统黄土及古土壤($\text{Qp}_3^{\text{el+eol}}$)、中更新统黄土及古土壤($\text{Qp}_2^{\text{el+eol}}$)、新近系红黏土层(N_2),最下部为侏罗系砂、泥岩互层(J)。该剖面处土层最大厚度

约为 112 m(填筑体土层厚度约为 106.5 m,原场地土层厚度约为 5.1 m),沟谷斜坡的坡度变化范围为 30° ~ 50°,通过钻探取样实测最大干密度为 1.89 g/cm³,最小

干密度为 1.53 g/cm³,按厚度加权的平均干密度约为 1.65 g/cm³。

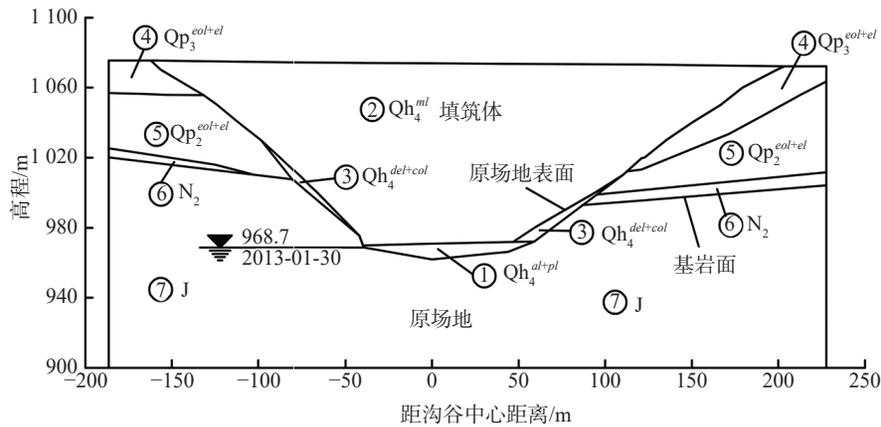


图 1 原型的地质剖面图

Fig. 1 Geological cross-section of the prototype

2 离心模型试验概况

本次离心模型试验采用的试验设备为 CKY-200 型土工离心试验机。土工离心试验机的最大有效容量为 200 g-t,最大加速度为 200g,有效半径为 3.7 m,模型箱的长、宽、高分别为 100 cm、40 cm、80 cm。模型中分层夯实黄土最深为 0.7 m,模拟原型沟谷中心处最大填土厚度为 112 m,模型缩尺为原型的 1/160,因此本次离心模型试验的最大离心加速度设置为 160g,使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同,能再现原型特性^[19]。

2.1 测试方法

本次离心模型试验所用 Qp₂^{col} 黄土取自依托工程场地的挖方区。根据《土工试验方法标准》^[20]测得土样的(液限)w_L=16.8%、(塑限)w_p=29.9%、(颗粒比重)G_s=2.73。黄土的颗粒分析曲线如图 2 所示,(不均匀系数)C_u=9.65,(曲率系数)C_c=1.15,(平均粒径)d₅₀=0.042 mm,属级配良好填料。重型击实试验曲线如图 3 所示,试验测得(最大干密度)ρ_{dmax}=1.94 g/cm³,(最优含水率)w_{op}=12.1%。

2.2 模型设计

土工离心模型试验尚无法实现模型与原型完全相似,为此需参照原型场地的原场地和填筑体特征,构建近似原型的简化地质概化模型。原型沟谷两侧的地形与地质条件基本一致,为此本次制作半对称沟谷模型,沟谷坡度设置为 45°。离心模型的构造及实物如图 4 所示。考虑到原型沟谷区的下部场地为全、强、中风化砂

泥岩,其刚度大,填筑施工过程基本无变形,原场地实测天然状态下的单轴抗压强度范围为 2.26 ~ 25.37 MPa,将原场地替代为用重晶石、水泥和石膏浇筑的刚性地

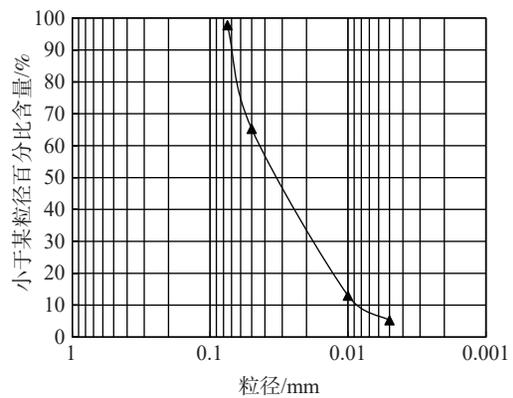


图 2 颗粒分析曲线

Fig. 2 Particle analysis curve

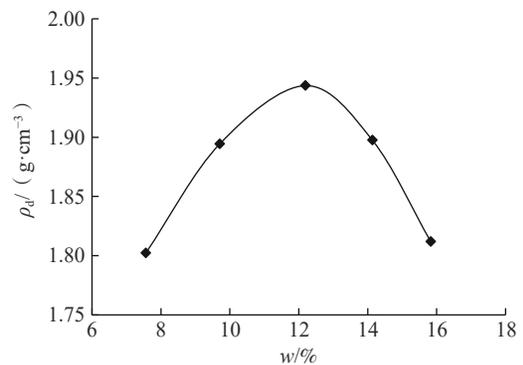


图 3 重型击实试验曲线

Fig. 3 Heavy compaction test curve

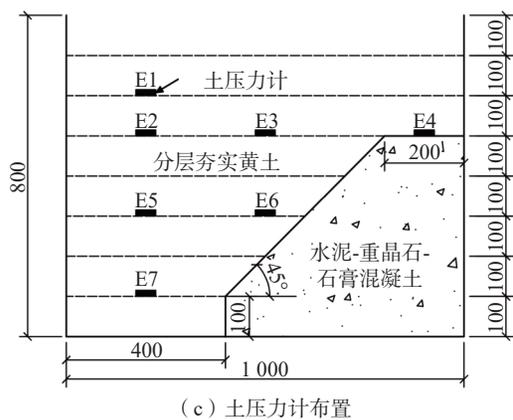
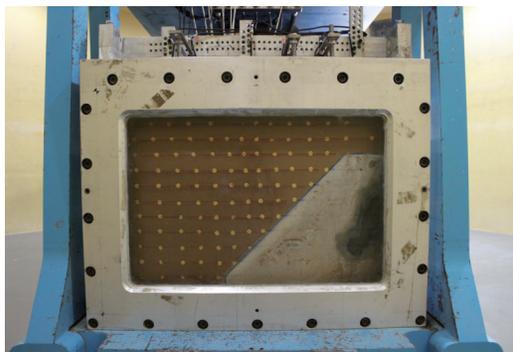
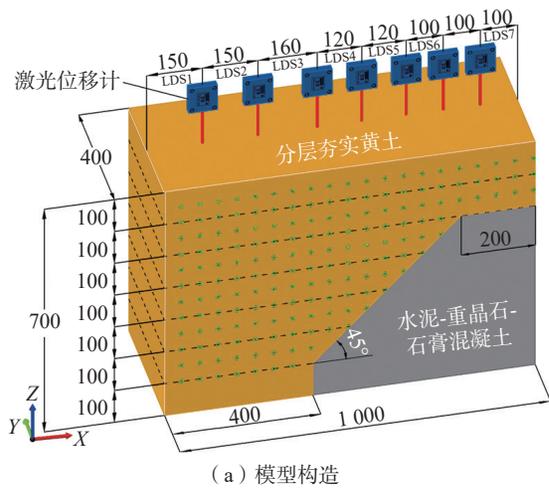


图 4 模型构造及实物照片(单位: mm)

Fig. 4 Model construction and actual photos

基。经过配比制备并对该沟谷模型留取的试块进行测试,测得其弹性模量为 2.79 GPa,抗压强度为 16.3 MPa,测试结果与原场地近似,能够模拟岩质原场地。原场地和填筑体土层统一采用夯实土来模拟。模型中黄土填料的 $w=12.0\%$ 、 $\rho_d=1.65 \text{ g/cm}^3$ 。本次模型内部的土压力监测采用微型土压力计,微型土压力计的厚度为 2 mm,直径为 12 mm,最大量程为 2 000 kPa,测量精度为 $\pm 0.1\%$ F.S;模型顶面沉降监测采用激光位移计,激光位移计的最大量程为 50 mm,测量分辨率 8 μm 。本次模型箱侧

壁采用透明有机玻璃加工制作,为观测填土内部变形,在填土分层制样过程,在填土侧表面布设了分层位移标示点。试验时采用高速摄像机拍摄分层位移标示点的初始位置,试验过程追踪分层位移标示点的位置轨迹,利用 GeoPIV 图像处理技术对图像进行处理,即可得到填土的变形位移场。

2.3 加载方法

离心模型试验无法直接模拟原型填土自重荷载逐步增大的过程,为了近似模拟该试验过程,一些学者提出了三种方法:变加速度加载法、恒加速度加载法和停机加载法等^[21-22]。本次试验采用“变加速度加载法”来模拟实际土方填筑过程,即通过逐级增大加速度模拟土方填筑施工,同时模拟土体固结过程。试验加载时离心加速度从 0g 开始,每增加 20g 后稳定运行 7 min,共经过 8 级、56 min 加载到 160g,然后维持加速度 160g 不变运行 107 min,模拟工后期填土固结压缩过程。

3 试验结果与分析

(1) 裂缝发育位置及特征

离心机停机后,模型顶部裂缝的开裂发育情况如图 5 所示。由图可知,裂缝出现位置主要在模型沟谷斜坡的坡肩附近,裂缝宽度较大、深度较深,主裂缝的特征点 A、B、C 距离模型箱右侧内壁从上至下依次为

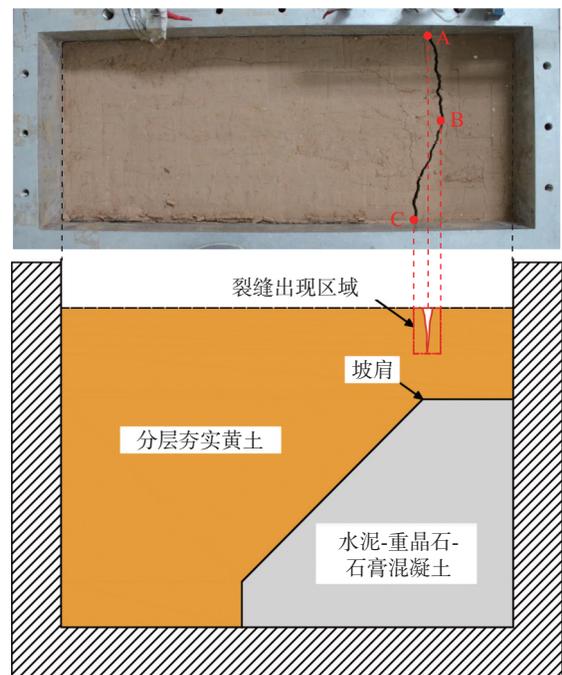


图 5 离心模型中出现的裂缝照片

Fig. 5 Photo of the crack in the centrifugal model

17 cm、16 cm 和 22 cm，裂缝的表面宽度为 5 ~ 8 mm、深度约 9 ~ 10 cm(对应原型 14.4 ~ 16.0 m)，裂缝沿深度方向的发育近乎垂直。

(2) 沉降分布特征及变化规律

根据离心模型试验中模型与原型的比例关系^[23]，将离心模型试验结果等效换算为原型结果，得到离心模型试验表面沉降曲线如图 6 所示，表面沉降观测结果如表 1 所示。由图可知，从模型沟谷中心向外侧斜坡方向，填土厚度逐渐变薄，地表沉降逐渐降低。由于沟谷坡度、填土厚度发生变化，填筑体在固结过程中会产生明显的不均匀沉降。

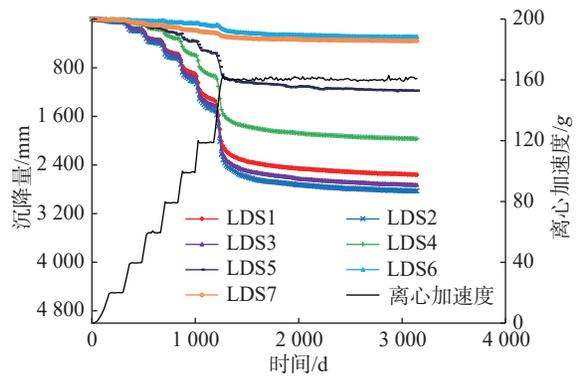


图 6 离心模型的表面沉降曲线

Fig. 6 Surface settlement curve of the centrifuge model

表 1 模型对应原型的表面沉降统计结果

Table 1 Statistical results of surface settlement for the model corresponding to the prototype

值别	LDS1	LDS2	LDS3	LDS4	LDS5	LDS6	LDS7
原型填土厚度/m	112	112	86.4	67.2	48	32	32
总沉降/mm	2 609	2 806	2 671	1961	1 174	284	354
施工期沉降占比/%	77.1	79.1	79.8	75.9	77.3	51.4	77.4
变形倾度/%	/	LDS1 ~ LDS2 0.82	LDS2 ~ LDS3 0.53	LDS3 ~ LDS4 3.70	LDS4 ~ LDS5 4.10	LDS5 ~ LDS6 5.56	LDS6 ~ LDS7 0.44

本次采用变形倾度^[17]来表征高填方体的不均匀沉降程度，其基本原理如图 7 所示，在场内同一高程处有 a 和 b 两个观测点，两点间水平距离为 Δx，如在某日期测得两点间的累计沉降差为 ΔS，则定义 a 和 b 两点在该日期的变形倾度 β 为

$$\beta \approx \tan\beta = \frac{\Delta S}{\Delta x} \times 100 = \frac{S_a - S_b}{|x_a - x_b|} \times 100 \quad (1)$$

对离心模型试验产生裂缝时激光位移计对应土体顶部的变形倾度值进行计算与分析，式(1)中 S_a 、 S_b 分别为相邻监测点处的激光位移计观测到的填筑体表面沉降值，其中 $S_a \geq S_b$ ； x_a 、 x_b 分别为 a、b 所在位置 X 轴坐标值。设土体发生张拉裂缝的临界变形倾度为 γ_c ，若 $\gamma \geq \gamma_c$ ，则认为该处土体将产生错动破坏面出现张拉裂缝。由表 1 中数据可知，试验结束时，坡肩附近

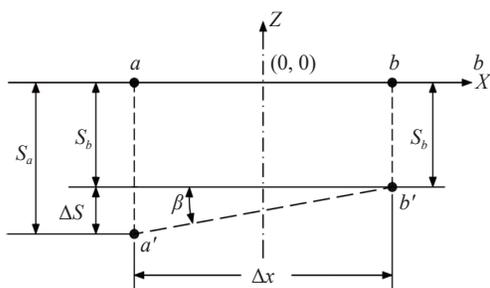


图 7 变形倾度法

Fig. 7 Deformation gradient method

的变形倾度值为 5.6%(监测点 LDS5 ~ LDS6 之间)，是变形倾度最大值出现的位置，与模型裂缝出现位置相对应。

本次以离心加速度达到 160g 时模型断面照片为基准，对维持离心加速度 160g 运行至沉降稳定时的模型断面照片进行分析，得到模型与对应原型断面的位移矢量图如图 8 所示。由图可知，填土内部变形是沉降变形和水平变形的矢量叠加，其中沟谷区以沉降变形为主，坡肩附近除发生沉降变形外，还发生了较大的水平变形。在坡肩附近，变形矢量方向变化最为明显，土体的水平位移和竖向位移变化梯度均较大，导致土中应力发生重分布。由于坡肩附近水平变形较大，土体发生受拉破坏，该处出现近乎垂直的张裂缝，随着差异沉降的增大，还将发生剪切滑动。从位移矢量图可以看出，原始坡体斜面中部及以下部分发生填土与接触界面的滑移，虽然填土滑动位移量较小，但会在一定程度上带动斜面中部及以下范围内邻近接触面的土体，增大坡肩位置土体的拉应力，促进裂缝发育。因此实际黄土高填方工程中需要对接坡面和挖填交界区采用人工清表、开挖台阶和强夯等方式进行处理，防止发生填土与原场地接触界面的滑移。

(3) 模型内部的土压力分布特征

当离心机达到加速度 $a_n=160g$ 后保持不变，模型内部土压力观测结果如表 2 所示(测点编号 E3 处土压力

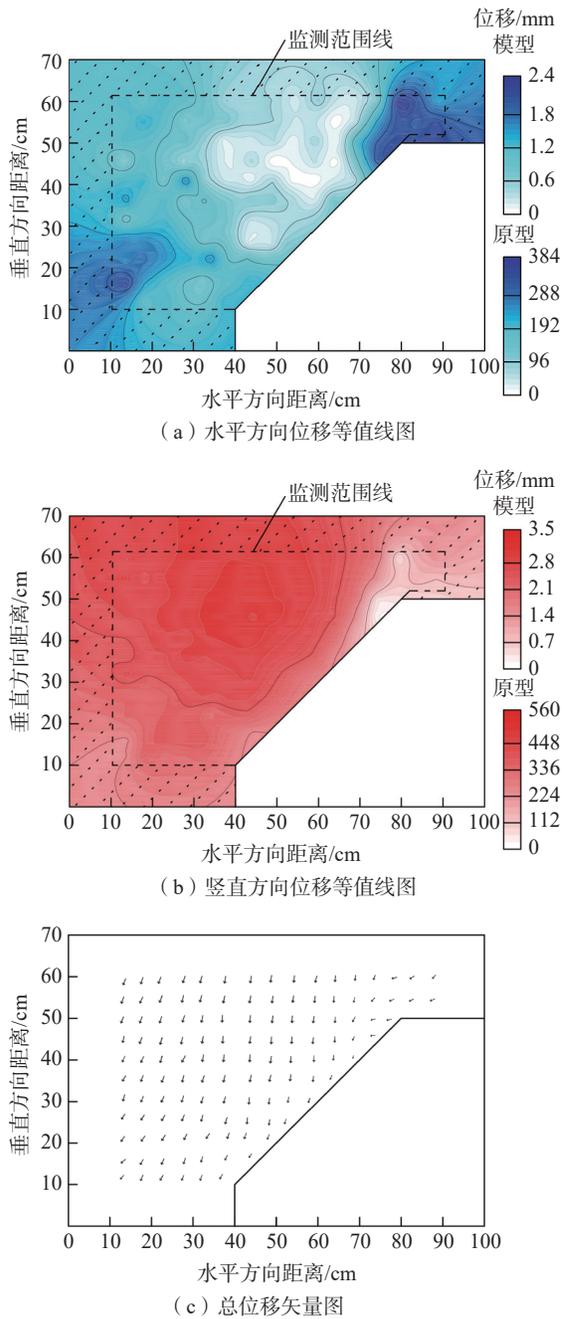


图 8 离心模型的工后分层沉降矢量图

Fig. 8 Post-construction stratified settlement vector diagram of the centrifuge model

计损坏, 未获得观测值)。表 2 中采用土柱法计算土压力计算值 $p=\gamma h$, 其中 γ 为填土重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$, h 为填土厚度/m。当填土厚度相同时, 模型内同一高程位置沟谷中心向沟谷斜坡方向土压力观测值递增, 在沟谷中部高程处, 实测土压力为土柱自重压力的 0.78 ~ 0.95 倍, 在沟谷斜坡和坡肩处, 实测土压力为土柱自重压力的 1.04 ~ 1.22 倍, 即沟谷中部的部分土压力由沟谷斜坡处分担。Qp₂ 黄土填料绝大多数是粉黏粒, 黏聚力和内摩

擦角都较大, 因此在产生不均匀沉降时, 会使土颗粒间产生相互“楔紧”的作用, 在模型的填土内部产生“土拱效应”。土拱效应的产生, 将使土拱以上土体的荷载向两边转移, 结果使场地中间部位的压力减小, 两边拱脚的压力增大, 调整了场地不均匀沉降^[24], 对减少填方体裂缝有利。

表 2 离心模型试验中土压力观测结果

Table 2 Observations of soil pressure during the centrifuge model experiment

测点编号	E1	E2	E4	E5	E6	E7
模型中水平方向距离/cm	20	20	90	20	50	20
对应原型中水平方向距离/m	32	32	144	32	80	32
模型中埋深/cm	10	20		40		60
对应原型中埋深/m	16	32		64		96
计算值/kPa	296	591	591	1 183	1 183	1 774
观测值/kPa	352	564	720	920	1 225	1 545

(4) 裂缝产生机制分析

原型区域的裂缝分布如图 9 所示。由图可知, 裂缝在空间分布上集中分布在挖填交界过渡区填方场地一侧, 在原场地地形起伏变化较大的位置出现了主干裂缝和伴生裂缝组成的裂缝带。裂缝发育产状与原场地地形有显著对应关系, 主干裂缝走向与原场地沟谷坡体等高线或挖填界线基本一致, 并沿原沟谷斜坡地形曲折变化。本文的模型试验结果能够揭示黄土高填方场地裂缝发育的基本特征。根据文献^[25]的研究成果, 填土中裂

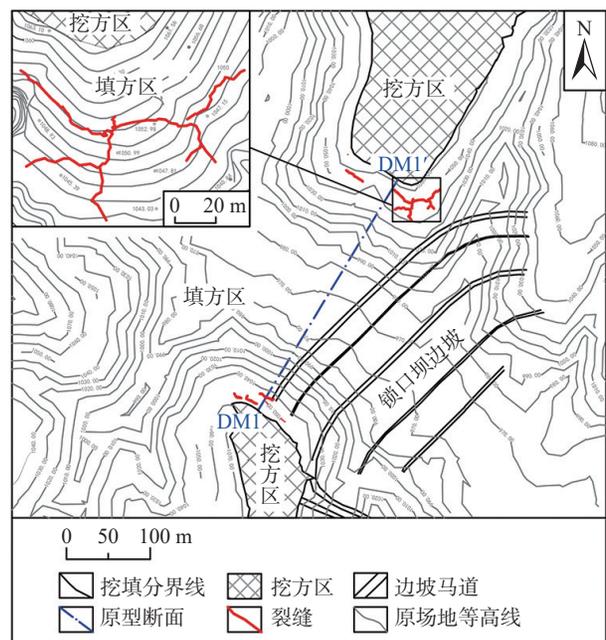


图 9 原型区域的裂缝分布图

Fig. 9 Crack distribution map of the prototype area

缝的出现实际是土体发生断裂破坏的一种表现形式。由前文图 8 可知,沟谷地形中的黄土高填方场地在横断面处产生了中间大、两边小的不均匀沉降,同时产生指向沟谷中心方向的水平位移。由土力学应力应变关系^[26]可知,填挖交界线填方一侧土中会产生拉应力,拉应力使填土中颗粒或土团之间存在的结构联系逐渐破坏,发展成为裂隙,这些裂隙逐步扩展,形成填土表面可见的宏观裂缝。此时,沉降变形持续发展,还会沿裂缝带将继续产生剪切滑动。

4 裂缝的工程防控措施

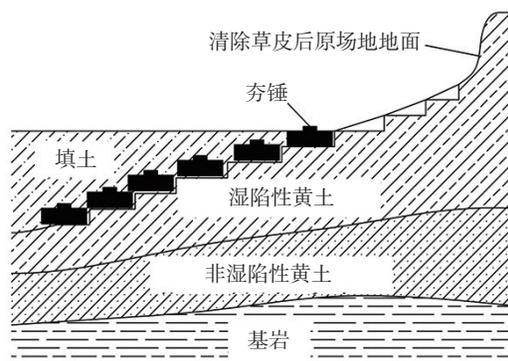
为避免裂缝发育对场地后续使用的影响,本次根据离心模型试验揭示的裂缝发育规律,结合类似高填方工程实践,建议黄土高填方工程在原场地处理和土方填筑过程采取以下针对性的处理措施:

(1) 接坡面的处理

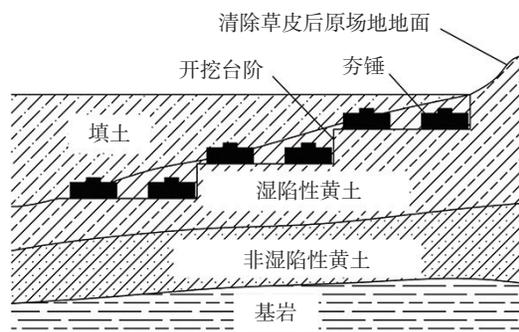
原场地沟谷斜坡与填筑体的接坡面处理不当往往会变成高填方场地内部的薄弱面,若二者发生错动形成裂缝带,会成为天然降水汇聚下渗的通道。因此,在土方填筑施工过程中,需要对接坡面进行专门处理,保证沟谷斜坡部位的上覆填土与原场地地层紧密结合。接坡面处理示意图如图 10 所示,对接坡面进行处理时应首先在沟谷斜坡上开挖台阶,然后在台阶面上采用强夯法对湿陷性黄土进行处理。实际工程中开挖台阶的宽度和高度需根据原场地沟谷斜坡的坡度大小调整,强夯能级、夯点间距和布置等则根据湿陷黄土层厚度、湿陷等级和分布等灵活调整。

(2) 挖填交界区的处理

挖填交界区是指位于挖填交界线两侧一定范围的区域,通常指挖填交界线挖方区一侧 10 m,填方区一侧 15 m 的范围^[27]。挖方区与填方区相比不会出现显著沉降甚至会因为卸载产生回弹变形,尤其是当挖方区原场地为基岩时,原场地无法柔性调整上覆填土变形,若不重视挖填交界区的处理,会使挖填交界区产生过大差异沉降,容易造成地面开裂破坏。对挖填交界区处理时应采取较缓的坡比或较大宽高比的台阶,从而减少在填土厚度变化较大处产生地差异沉降,使沉降由突变转变为平稳过渡,还可以有效的减少交界区土体内部的应力集中,从而减少交界区位置发生剪切破坏的概率。挖填交界区处理示意图如图 11 所示,当土方填筑施工至设计标高后,应在挖填零线两侧 10~15 m 的范围采用强夯法补强处理。



(a) 陡坡



(b) 缓坡

图 10 黄土高填方接坡面处理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of slope interface treatment in high loess fill

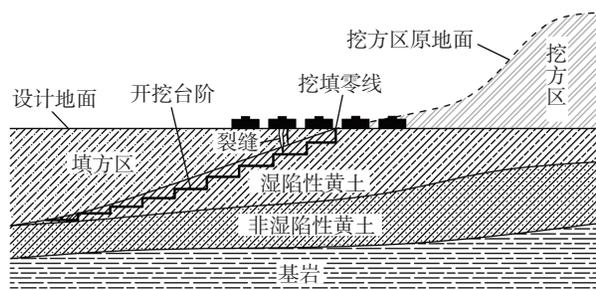


图 11 挖填交界区处理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of treatment in the excavation-fill interface area

5 结论

(1) 离心模型试验揭示了不均匀沉降、水平位移会引起沟谷地形中的黄土高填方场地在挖填交界带内发育裂缝。

(2) 离心模型试验揭示同一高程位置的土压力观测值由沟谷中心向沟谷斜坡方向递增,在模型的填土内部产生“土拱效应”,这对减少不均匀沉降有利。

(3) 离心模型试验与现场监测结果显示,原型与模型中裂缝的分布区相对应,土体应变超过破坏拉应变,应力超过拉裂强度,拉剪联合作用是裂缝产生的主要原因。

(4)为避免裂缝灾害影响,对接坡面采用开挖台阶和强夯处理,对挖填交界区内挖填零线两侧 10~15 m 的范围采用强夯法处理,从而减少裂缝发育。

参考文献(References):

- [1] 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, et al. 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)]
- [2] 赵文博, 曹佳文, 郭长宝, 等. 甘肃岷县阳坡村大型古滑坡发育特征与稳定性评价 [J]. *地质通报*, 2024, 43(10): 1869 - 1880. [ZHAO Wenbo, CAO Jiawen, GUO Changbao, et al. Developmental characteristics and stability simulation of Yangpo Village large-scale ancient landslides in Minxian County, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(10): 1869 - 1880. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 薛强, 张茂省, 董英, 等. 基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例 [J]. *中国地质*, 2023, 50(3): 926 - 942. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing: Taking Mizhi County in the Loess Plateau of northern Shaanxi as an example [J]. *Geology in China*, 2023, 50(3): 926 - 942. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王云强, 张少康, 张萍萍, 等. 黄土高原关键带土壤水文过程研究进展与展望 [J]. *地质通报*, 2024, 43(8): 1346 - 1360. [WANG Yunqiang, ZHANG Shaokang, ZHANG Pingping, et al. Research progress and prospect of soil hydrological processes in critical zone of the Loess Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1346 - 1360. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 85 - 92. [YU Yongtang, ZHENG Jianguo, ZHANG Jiwen, et al. Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 85 - 92. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 马翔, 赖国泉. 某山区机场高填方滑坡变形特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(4): 16 - 23. [MA Xiang, LAI Guoquan. Analysis on deformation monitoring of a high fill landslide in a mountain airport [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(4): 16 - 23. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 毛正君, 于海泳, 梁伟, 等. 基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别及特征分析 [J]. *中国地质*, 2024, 51(2): 561 - 576. [MAO Zhengjun, YU Haiyong, LIANG Wei, et al. Identification and feature analysis of regional loess landslides based on UAV tilt photogrammetry 3D modeling [J]. *Geology in China*, 2024, 51(2): 561 - 576. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈林万, 裴向军, 张晓超, 等. 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 137 - 147. [CHEN Linwan, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 137 - 147. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 余岱金, 黄强兵, 康孝森, 等. 黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 119 - 128. [YU Daijin, HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, et al. A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 119 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 俞清荣. 高填方路路基纵向裂缝的预防及处理措施 [J]. *路基工程*, 2011(2): 166 - 168. [YU Qingrong. Prevention and treatment measures of longitudinal cracks in high fill subgrade [J]. *Subgrade Engineering*, 2011(2): 166 - 168. (in Chinese with English abstract)]
- [11] SHERARD JAMES L. Embankment dam cracking [C]. *Geotechnical Special Publication*. New York: ASCE, 1992: 131 - 215.
- [12] WANG J D, XU Y J, MA Y, et al. Study on the deformation and failure modes of filling slope in loess filling engineering: A case study at a loess mountain airport [J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2423 - 2435.
- [13] 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)]
- [14] 李青云, 濮家骝, 殷昆亭, 等. 防渗墙施工引起堤防裂缝的离心模型试验研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(4): 543 - 545. [LI Qingyun, PU Jialiu, YIN Kunting, et al. Analysis of levee cracking during diaphragm wall construction using centrifuge model tests [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, 42(4): 543 - 545. (in Chinese with English abstract)]
- [15] SHCHERBINA V I, OLYMPIEV D N. Numerical and

- centrifugal modeling of cracking in an earth-and-rockfill dam core [C] //Francis G. McLean. Centrifuge 91. Netherlands: Balkema A A, 1991, 67 - 72.
- [16] 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. Study on cracks in core wall of earth-rock dam with centrifugal model [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6): 82 - 95. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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 cracking in earth core dams [J] . Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1254 - 1258. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 牛起飞, 侯瑜京, 梁建辉, 等. 坝肩变坡引起心墙裂缝和水力劈裂的离心模型试验研究 [J] . 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1935 - 1941. [NIU Qifei, HOU Yujing, LIANG Jianhui, et al. Centrifuge modeling of cracking and hydraulic fracturing in core dams induced by abrupt change of bank slope [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1935 - 1941. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 濮家骝. 土工离心模型试验及其应用的发展趋势 [J] . 岩土工程学报, 1996, 18(5): 96 - 98. [PU Jialiu. Geotechnical centrifuge model test and its application development trend [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 96 - 98. (in Chinese)]
- [20] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S] . 北京: 中国计划出版社, 1999. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S] . Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]
- [21] 蒋关鲁, 胡润忠, 李安洪. 离心模型试验预测中等压缩性土地基沉降的可行性 [J] . 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 17 - 23. [JIANG Guanlu, HU Runzhong, LI Anhong. Feasibility of predicting settlement of medium compression soil foundation with centrifuge model tests [J] . Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 17 - 23. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 章为民, 徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法 [J] . 水利学报, 1997, 28(2): 8 - 13. [ZHANG Weimin, XU Guangming. Study on modeling the construction process of embankment dams in centrifugal test [J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(2): 8 - 13. (in Chinese)]
- [23] 中华人民共和国行业标准编写组. 土工离心模型试验规程: DL/T 5012—1999 [S] . 北京: 中国电力出版社, 2013. [The National Standards Compilation Group of People's Republic of China: DL/T 5012—1999 [S] . Beijing: China Electric Power Press, 2013. (in Chinese)]
- [24] 杨雪强, 何世秀, 庄心善. 土木工程中的成拱效应 [J] . 湖北工学院学报, 1994, 9(1): 1 - 7. [YANG Xueqiang, HE Shixiu, ZHUANG Xinshan. Arch forming effect in civil engineering [J] . Journal of Hubei University of Technology, 1994, 9(1): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陆士强. 填土的断裂机理 [J] . 岩土工程学报, 1980, 2(2): 20 - 25. [LU Shiqiang. The mechanism of fracture of compacted soils [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(2): 20 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李广信. 高等土力学 [M] . 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016. [LI Guangxin. Advanced soil mechanics second edition [M] . 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)]
- [27] 中国工程建设标准化协会. 黄土高填方场地与地基技术规程: T/CECS 1430—2023 [S] . 北京: 中国计划出版社, 2023. [China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for loess high fill site and foundation: T/CECS 1430—2023 [S] . Beijing: China Planning Press, 2023. (in Chinese)]