

中文引用格式:梅源,苗梦娜,田新宇,等. 基于离心模型试验的裂隙黄土地基沉降变形分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(4): 114-122.

英文引用格式:Mei Yuan, Miao Mengna, Tian Xinyu, et al. Settlement deformation analysis of fissured loess foundation based on centrifugal model test[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 114-122.

基于离心模型试验的裂隙黄土地基沉降变形分析^{*}

梅源^{1,2}教授, 苗梦娜^{**1,2}, 田新宇^{1,2}, 乐亚楠^{1,2}, 余雅楠^{1,2}

(1 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

中图分类号:X935

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0761

基金项目:国家自然科学基金资助(52178302)。

【摘要】 为探究既有裂隙对高填方压实黄土地基沉降变形特性的影响,以平坦场地高填方工程为背景,采用土工离心模型试验方法,设计并对比分析无裂隙与含裂隙2组高填方地基模型在加载过程中的变形与破坏特性。结果表明:裂隙改变地基的破坏形态,由单一拉裂转变为拉剪复合破坏,表现为裂隙拓展、树枝状裂缝网络及阶梯错动等复杂破坏特征;裂隙降低地基整体刚度与稳定性,使含裂隙地基沉降早于无裂隙地基发生,总沉降量增大,沉降分布更加不均,地表沉降呈“V型”集中态势,随荷载增加而显著加剧;此外,裂隙结构对地基应力分布具有明显的分层影响,竖向应力表现为上部集中、中部削弱、底部影响较小,水平应力则在底部发生集中、中上部释放,改变应力传递路径,增加局部失稳风险。

【关键词】 离心模型试验; 含裂隙地基; 黄土地基; 沉降变形; 地基沉降; 破坏特征

Settlement deformation analysis of fissured loess foundation based on centrifugal model test

Mei Yuan^{1,2}, Miao Mengna^{1,2}, Tian Xinyu^{1,2}, Le Yanan^{1,2}, Yu Yanan^{1,2}

(1 School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an

Shaanxi 710055, China; 2 Shaanxi Key Lab of Geotechnical and Underground Space

Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: To investigate the influence of pre-existing fissures on the settlement and deformation behavior of high-fill compacted loess foundations, geotechnical centrifuge model tests were conducted for a flat-terrain high-fill engineering scenario. Two foundation models, an intact model and a fissured model, were designed and comparatively examined during the loading process with respect to deformation development and failure characteristics. The results show that the failure mode is transformed by fissures from a single tensile-cracking pattern to a combined tensile-shear failure, in which fissure propagation, a branched crack network, and stepped surface dislocation are formed. The overall stiffness and stability of the foundation are reduced by fissures; settlement is initiated earlier than in the intact model, the total

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0114-09; 收稿日期:2025-11-23; 修稿日期:2026-02-05

** 通信作者:苗梦娜(2002—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为土木工程施工与岩土力学。E-mail:2963762064@qq.com。

settlement is increased, and the settlement distribution is more non-uniform. A V-shaped concentration pattern of surface settlement is exhibited and is markedly intensified with increasing load. In addition, a distinct stratified effect on stress distribution is induced by the fissure structure: vertical stress is concentrated in the upper layer, weakened in the middle layer, and only slightly affected in the lower layer, whereas horizontal stress is concentrated near the bottom and released in the middle and upper layers. These changes reconstruct stress-transfer paths and increase the risk of local instability.

Keywords: centrifuge model test; fissured foundation; loess foundation; settlement deformation; foundation settlement; failure characteristics

0 引言

随着我国基础设施建设的纵深推进,城市开发逐步向复杂地质区域拓展,平坦场地高填方工程日益普遍。西部地区工程中黄土应用广泛,但受施工扰动与干湿循环等因素影响,土体易形成天然或次生裂隙^[1],导致地基出现不均匀沉降、裂隙扩展及局部失稳等问题,进而威胁工程安全与耐久性。

近年来,围绕裂隙性黄土的研究主要从宏观力学响应与微观结构演变2个层面展开^[2],并逐步引入CT扫描、数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)等量化表征裂隙形态和演化机制^[3-4]。土工离心模型试验可在缩尺条件下重建与原型相当的应力水平,已成为研究复杂地基变形与破坏的重要方法^[5]。相关成果围绕渗透致沉降^[6]、水土耦合劣化、高填方沉降差异^[7-8]及碎石桩、水泥粉煤灰碎石桩等复合地基^[9-10]加固机制开展了较为系统的研究。为满足模型试验对裂隙几何与界面性质的需求,国内外提出多种人工裂隙构造技术,包括填入细砂/石膏粉形成弱界面^[11-12]、夹置塑料薄膜形成物理隔离界面^[13]以及预设切缝获得可控裂隙几何^[14]。然而,上述方法多建立于1g(g 为重力加速度)条件假设,在离心高 g 场的高应力与高应变梯度环境下易出现界面材料迁移、渗透与摩阻特性偏离、薄膜滑移褶皱或切缝闭合/失稳扩展等问题,从而削弱裂隙几何稳定性与结果可比性。为此,部分研究开始采用具有柔韧性 with 一定亲水性的纸类介质插入压实土体以模拟裂隙^[15-16],以提升高 g 场下界面保持与变形协调能力。总体而言,现有成果缺乏针对平坦场地高填方工况下,裂隙结构对压实黄土地基沉降变形影响的系统性离心试验支持。

鉴于此,笔者拟以典型平坦场地高填方压实黄土地基为研究对象,开展含裂隙与无裂隙2类地基的离心模型对比试验,分析地表沉降特性、应力场演化及裂隙扩展破坏特征。重点揭示裂隙结构对地基

沉降变形机制的影响特征,探索高填方压实黄土地基在结构性削弱条件下的破坏模式。以期为裂隙黄土地基的稳定性评估与工程加固提供理论依据。

1 离心模型试验方案设计

1.1 离心模型试验设备与量测装置

1) 离心机。采用土工离心机进行模型试验,如图1所示。该离心机最大加速度为200 g ,有效半径为2m,可提供60 $g \cdot t$ 的容量,能够模拟原型土体在重力场中的真实应力状态且满足对模型尺寸和加载条件的要求。



图1 土工离心机

Fig. 1 Geotechnical centrifuge

2) 模型箱。为满足边界条件、尺寸效应及观测需求,自制内部尺寸为760 mm×330 mm×630 mm(长×宽×高)的模型箱。箱顶为开放式,箱底铺设10 mm厚防滑高刚度钢板;正面与侧面采用20 mm厚可拆卸透明有机玻璃板,兼顾可视化观测与抗土压力能力。模型箱结构经有限元分析验证,可在最大离心加速度下满足强度与稳定性要求,为试验提供可靠边界条件。

3) 量测装置。离心机配数据采集系统,具备有线与无线2种通信模式。该系统支持36个测点,通过计算机软件远程操控,实现试验过程中对土压力、孔隙水压力等物理量的多通道数据实时采集和存储。

试验共采用 8 个激光位移传感器测量模型地基的沉降变形,15 个土压力盒埋设于模型地基内部测量不同深度处土体应力分布及变化,3 个孔隙水压力传感器监测模型孔隙水压力,2 台高分辨率运动相机记录地基表面裂隙的扩展过程。

4) 试验材料。试验所用土样取自陕西省延安市高填方工程的 Q3 黄土,取样点原状 Q3 马兰黄土的颗粒粒径分布曲线如图 2 所示,模型地基采用压实黄土制备,其基本物理力学指标见表 1。模型原始地基土层自上而下共分为 2 层:①压实 Q3 黄土填方土层段,模型采用按照干密度 1.6 g/cm^3 、含水率 19.5% 的黄土颗粒配制而成的压实黄土代替。②原状 Q3 马兰黄土层段,模型采用干密度 1.7 g/cm^3 、含水率 19.5% 重塑压实黄土代替。

表 1 压实黄土基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indicators of compacted loess	
指标	数值
天然密度/(g/cm^3)	1.99
含水率/%	20.8
液限/%	27.2
塑限/%	21.5
内摩擦角/($^\circ$)	16.1
黏聚力/kPa	50.5

表 2 离心模型试验相似关系(原型/模型)

Table 2 Similarity relationship of centrifugal model tests (prototype/model)							
物理量	相似比尺	物理量	相似比尺	物理量	相似比尺	物理量	相似比尺
加速度	1/60	密度	1	应力	1	弹性模量	1
长度	60	重度	1/60	应变	1	剪切模量	1
面积	60^2	含水率	1	时间	1	内摩擦角	1
体积	60^3	孔隙比	1	位移	60	黏聚力	1
质量	60^3	泊松比	1	颗粒尺寸	1	抗弯矩	60^3

2) 测点布置。①地表沉降与相对位移监测。采用 8 个非接触式激光位移传感器(J1—J8)监测,通过铝合金支架跨置于模型箱顶部;中部对称布置 6 个监测横向沉降,前后各 1 个监测纵向沉降。透明侧壁外绘制 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 网格,并在网格交点预埋彩色大头钉作为特征点,结合图像分析获取相对位移以判识整体变形。②土压力与孔隙水压力监测。沿箱高三层埋设土压力传感器(T1—T15)和孔隙水压力传感器(K1—K3),距箱底分别为 100、250、400 mm。孔隙水压力用于验证离心加载下模型基本处于非饱和状态并为后续水-力耦合研究提供参考,笔者暂不作分析。T3、T8、T13 竖直布置测水平向土压力,其余传感器水平布置测竖向土压力;各层平面

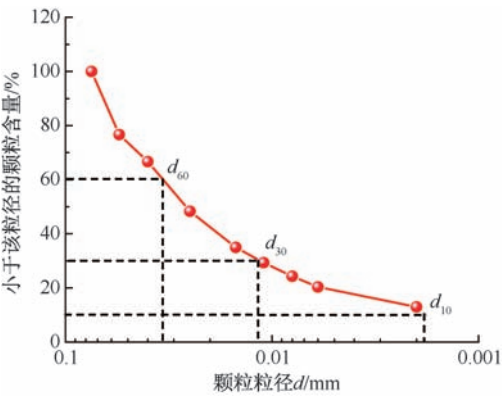


图 2 颗粒粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve diagram

1.2 离心模型试验方案设计

1) 相似关系及加载过程。离心模型试验依据相似理论将原型缩尺至模型尺度,并通过离心加速度场重建原型应力水平。试验取模型比尺 $N=60$,最大加速度 60 g ,确定相似关系见表 2。采用分级加载方式:以 10 g 为增量逐级升至 60 g ,每级稳定 5 min ;在 60 g 下保持 60 min ,实时监测土压力、孔隙水压力与位移。随后以 20 g 为增量逐级降至 0 g ,每级稳定 2 min ,记录回弹变形。2 模型采用相同加载路径以确保可比性。

布置与第一层一致,具体方案如图 3 所示。

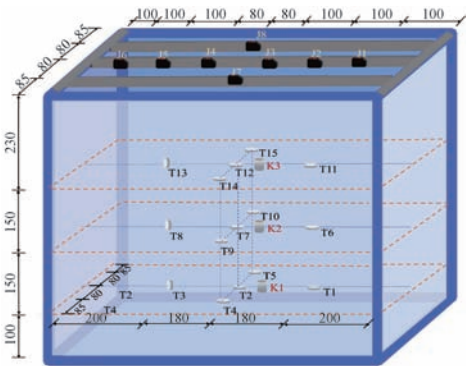


图 3 传感器布置

Fig. 3 Sensor layout

3) 离心试验工况与裂隙构造方法选择。基于工程实际中裂隙性黄土的典型特征,分别设计 2 组试验:①无裂隙压实黄土地基模型;②含裂隙压实黄土地基模型。通过对比分析 2 组试验的最终破坏形态、位移场和应力场演化过程,探究既有裂隙对压实黄土地基沉降变形特性的规律。含裂隙模型预制 3 组贯穿型交叉裂隙(X1—X6),以透水性厨房纸巾(厚度约 0.18 mm)模拟;结合模型缩尺关系,该厚度处于合理范围。界面直剪试验表明:纸-土界面黏聚力与内摩擦角均低于母体土且弱化适中,能够表征天然裂隙“强度削弱、透水增强”的特征。

裂隙构造时,各层黄土填筑压实至设计高度后,采用厚度控制刀具沿预设走向切槽,槽宽控制为纸厚+约 0.2 mm,以保证界面插入紧密连续、无明显空隙。插入前雾化湿润厨房用纸,使其含水率接近母体土,减小吸力差异引起的界面效应。插入后对裂隙两侧土体轻度回击实,确保槽壁密实度与整体一致,避免局部欠压实造成弱面效应放大。该方法可稳定再现裂隙几何特征,并在高 g 场加载下实现与母体土的协同变形与渗透响应。裂隙构造如图 4 所示。

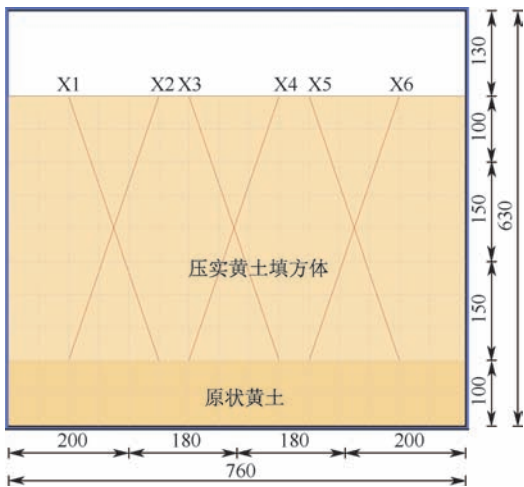


图 4 裂隙构造
Fig. 4 Fissure structure

1.3 离心模型试验步骤

- 1) 土样制备。原状黄土经 105 ℃ 烘干、破碎、过 2 mm 筛后,按最优含水率 19.5% 配置重塑土样,并密封静置 24 h 以上,使土样含水率均匀。
- 2) 模型制作。模型箱内壁涂抹凡士林减小摩擦,外侧绘制 5 cm×5 cm 网格作为变形参考基准线;按设定压实度,覆以聚氯乙烯板分层击实土样至设定高度,含裂隙模型中按预设裂隙位置开槽插入厨

房用纸模拟裂隙,并同步在各层埋设传感器与标识点;吊装模型箱,复合配重,安装位移传感器,并调试数据采集系统。

3) 施工期与工后沉降模拟试验。逐级施加离心加速度,模拟施工填筑过程;保持恒定加速度运行至模型内填土沉降变形稳定,模拟工后长期沉降。

对照组除不预制裂隙外,其余制备参数与试验方法均与含裂隙模型保持一致。

2 裂隙黄土地基沉降变形分析

2.1 模型破坏形态对比分析

1) 地表破坏特征对比。离心试验加载前后无裂隙和含裂隙模型的地表破坏如图 5 所示,由图 5 可知:无裂隙地基的最终破坏主要表现为一道中心横向长裂隙伴随左侧“Y 型”裂隙发育,最大裂隙宽度为 2.3 mm,反映拉应力集中导致的非均匀拉伸变形,整体呈现以拉裂为主的简单破坏模式;相比之下,含裂隙地基的裂隙发育更密集,两侧既有预制裂隙明显拓宽,最大裂隙宽度达 3.5 mm,地表中心衍生出大量长度超过 10 mm 并具 2 条以上分叉的“树枝状裂缝”,形成复杂的破坏网络,且表面出现 3 处阶梯状错动(最大垂直位移>2 mm)。表明应力优先沿原有裂隙释放并诱发剪切破坏,形成拉剪复合的破坏模式。

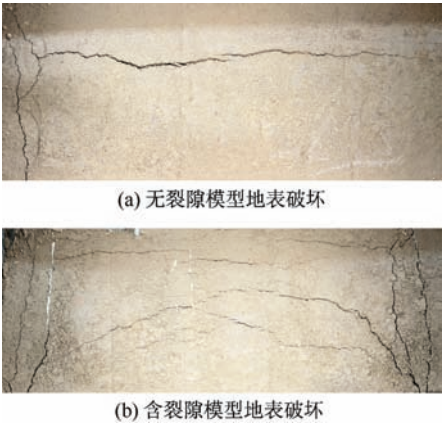


图 5 试验加载前后无裂隙和含裂隙模型地表破坏
Fig. 5 Surface failure patterns of intact and fissured foundations models before and after loading

2) 地基整体沉降变形对比。离心试验加载前后无裂隙和含裂隙地基模型的整体沉降变形如图 6 所示。图中竖向短箭头为各层土体竖向沉降量,斜向虚线和实线条分别为试验加载前后预制裂隙示意线。试验结果显示,无裂隙地基的沉降以上部压实黄土填方体为主,原状土区域沉降量较小;相比之

下,含裂隙地基的土体强度降低,稳定性较差,其整体沉降量显著大于无裂隙地基,变形范围沿水平方向发生扩展,原有预制裂隙整体向下发生约 5 cm 的不均匀沉降,且除竖向沉降外,还存在侧向位移。经分析,该现象主要是裂隙面的相对滑移与土体压缩共同作用,导致变形集中于裂隙网络周边区域。这一对比充分说明,裂隙的存在改变了地基的变形机制,使其由压缩主导的固结变形转变为以裂隙滑移为主的非连续破坏模式,加剧了地基的不均匀沉降程度。

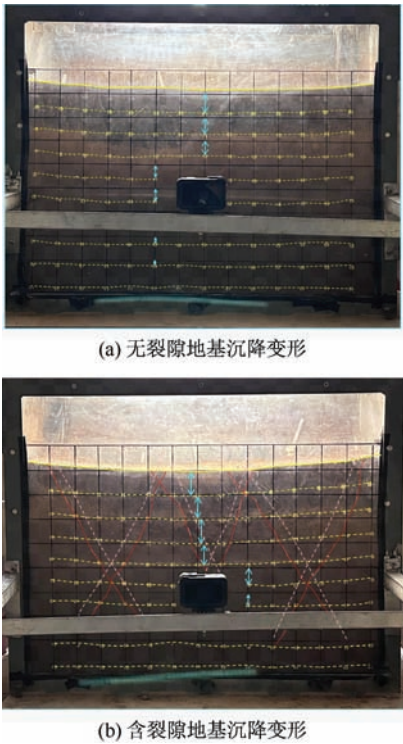


图 6 试验加载前后无裂隙和含裂隙地基模型的沉降变形
Fig. 6 Settlement deformation of intact and fissured foundation models before and after loading

从图 6 可以看出,既有裂隙对地基的破坏形态存在显著作用。无裂隙地基的地表破坏相对简单,以拉裂破坏为主,而含裂隙地基的破坏形态更为复杂,表现出裂隙扩展、局部剪切破坏以及更大的整体沉降变形,说明裂隙不仅削弱了地基的承载能力,也改变了应力分布模式,使其形成更复杂的破坏形态。

2.2 地基沉降特性对比分析

无裂隙与含裂隙地基模型在不同加速度工况 (10~60 g) 下,各测点的表面沉降量变化情况如图 7 所示。由图 7 可知:在低加速度 (10~20 g) 阶段,2 种模型的沉降曲线较为接近,曲线呈“平缓碗形”分布,中心测点 (J7、J8) 沉降最大,向两侧对称递减,沉降量均在 10 mm 以内,此时裂隙对整体变形的影

响较弱。随着加速度增至 30~60 g,含裂隙地基模型的沉降曲线呈“V 形”分布,中心测点沉降显著陡增,最大沉降量达 51.4 mm,与周边测点形成明显梯度差,且沉降差随加速度增大而加剧,说明裂隙的存在降低了地基的整体刚度,导致变形集中,与 2.1 节所述现象一致。此外,可以看出地基模型左侧测点 (J6、J5、J4) 的沉降量略大于对称位置的右侧测点 (J3、J2、J1)。经分析,这一现象主要归因于模型制备过程中,传感器线路布设对左侧填土局部区域的扰动,导致该区域土体密实度相对降低,进而引起刚度分布的微小差异。

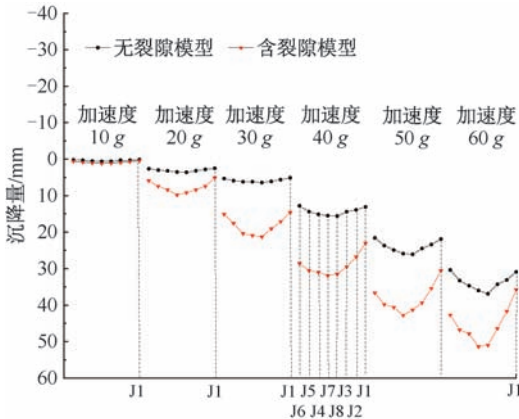


图 7 不同加速度下两组模型地表沉降变化曲线

Fig. 7 Surface settlement variation curves of two model groups under different acceleration levels

测点 J7 位于地基中心,其沉降过程可反映施工进度与地基变形关系,如图 8 所示。由 J7 沉降曲线可知,既有裂隙降低了地基初始刚度并更易诱塑性变形,使含裂隙地基在施工初期即发生沉降,而无裂隙地基初始沉降相对滞后。结合数据分析,施工期 (0~1 380 s) 内,含裂隙地基累积沉降为 44.7 mm,占总沉降 56.3 mm 的 79.4%;无裂隙地基施工期沉降为 28.5 mm,占最终沉降 38.7 mm 的 73.6%。由此可见:2 组地基的主要沉降均集中发生于施工期,含裂隙地基施工期沉降占比更高,变形响应更显著。工后阶段 (1 380 s 后),含裂隙地基仍产生 11.6 mm 沉降,说明裂隙可能形成弱面通道并引发结构松弛与附加变形,削弱长期稳定性。基于此,工程上宜采取注浆填充、颗粒注入等裂隙加固措施,并通过分层碾压与优化填料级配降低裂隙萌生风险,以控制施工沉降及工后长期沉降。

2.3 应力场变化特征对比分析

基于离心机最大加速度为 60 g 的加载试验结果展开分析,分别记录含裂隙与无裂隙地基不同测

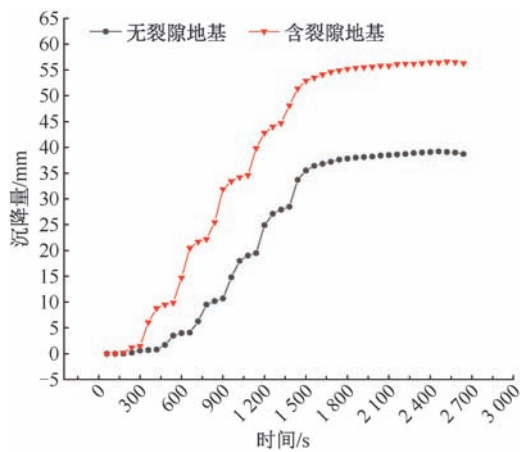


图 8 J7 测点随时间变化的沉降曲线
Fig. 8 Time-dependent settlement curves at point J7

点的土压力随时间的变化,并对比探讨裂隙结构对地基应力传递特征的影响。

1) 竖向应力特征。选取填方体底部中心位置(T2)、中部位置(T7)及上部位置(T12)处的竖向土

压力随时间变化曲线展开对比分析,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,随着加载进行,2 类地基中的竖向土压力均呈阶段性阶梯式上升,但测点间及 2 模型间差异明显。T2 位置处,含裂隙与无裂隙地基土压力发展趋势基本吻合,底部土体受裂隙结构影响较小。T7 位置处,含裂隙地基在施工中后期开始出现明显分化,其土压力增长速率低于无裂隙地基,且最终峰值显著偏低,裂隙区域土体出现局部结构松散或变形扩展现象,导致有效应力及竖向应力传递与承载能力削弱。与 T2、T7 位置处土压力相比,T12 处含裂隙地基在加载初期出现土压力突增,且整体土压力水平始终高于无裂隙地基。该现象可能由于地基表层裂隙发育,导致局部土体发生结构性破坏,使得荷载在浅部迅速传递并集中,从而引发初期土压力激增,同时在后续加载过程中,裂隙区域因压密和闭合使得土体刚度增强,维持了较高的土压力水平。

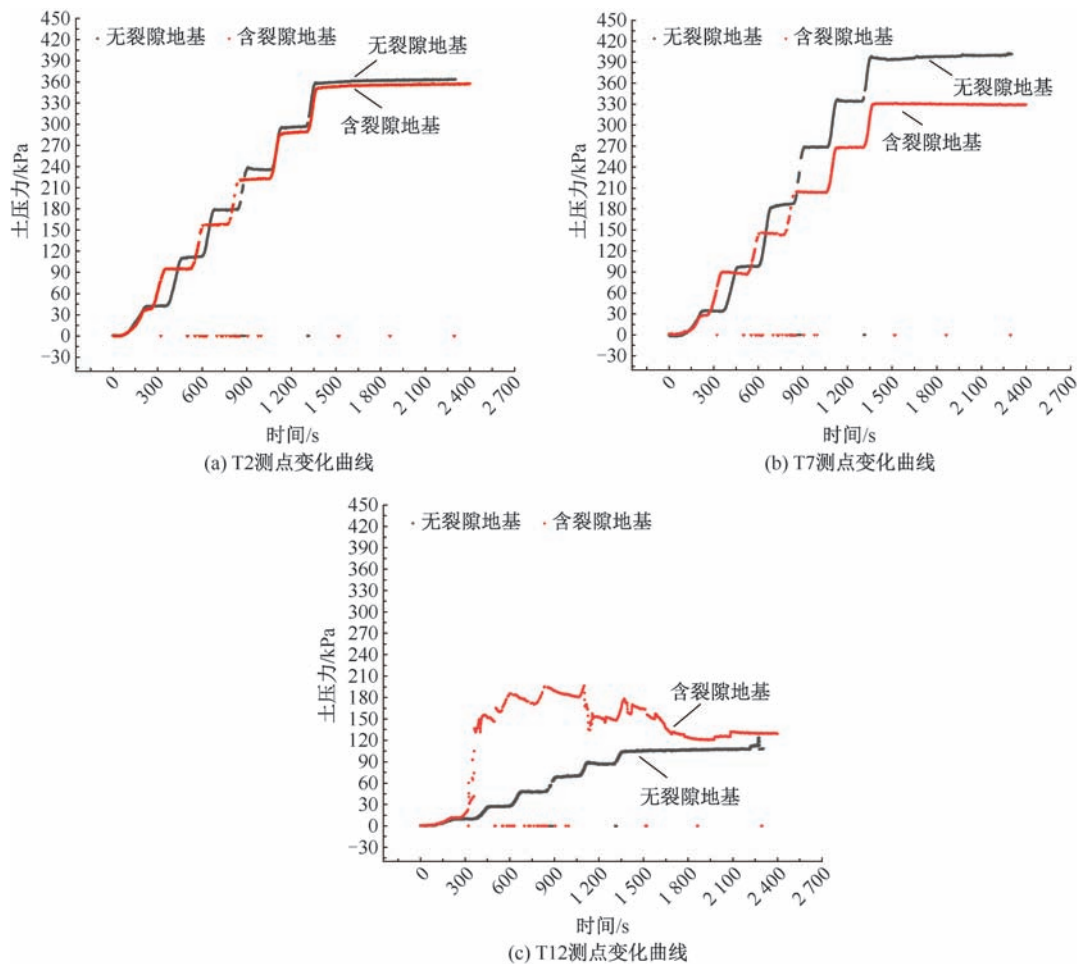


图 9 地基中心竖向土压力随时间变化曲线
Fig. 9 Temporal variation of vertical stress at foundation center

综上,竖向土压力在不同深度位置的变化特征表明:裂隙结构对上部地基影响最为显著,对中部地基产生一定削弱作用,而对底部地基影响较小。实际工程中,应关注浅层裂隙区域可能产生的应力集

中问题,避免局部不均匀沉降或破坏。

2) 水平向应力特征。为进一步揭示既有裂隙对地基水平向土压力分布的影响。对比分析 T3、T8 及 T13 这 3 个测点的数据,结果如图 10 所示。

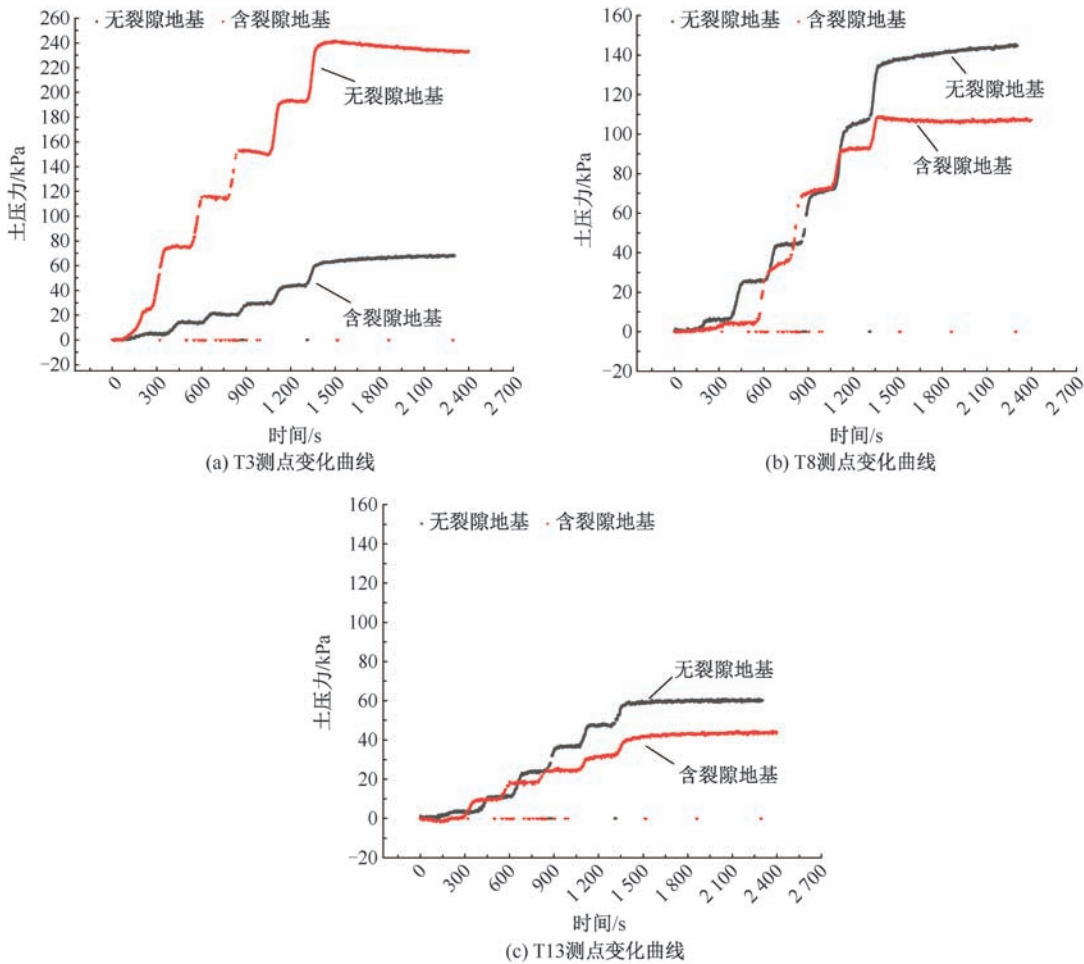


图 10 地基水平向土压力随时间变化曲线

Fig. 10 Temporal variation of horizontal stress in foundation

在填方体底部 T3 处,含裂隙地基水平向土压力显著高于无裂隙地基,峰值达 239.53 kPa,为无裂隙地基约 4 倍。分析认为,裂隙降低浅部土体刚度,荷载难以在浅层扩散并向下载集中传递,同时裂隙滑移与局部破坏进一步强化底部应力集中,致使水平向土压力显著增大。相较之下,中部 T8 与上部 T13 处含裂隙地基水平向土压力整体低于无裂隙地基且无明显突增,主要由于加载初期裂隙区发生滑移软化,部分荷载在上、中部提前释放或分散,并诱发应力重分配,形成局部应力松弛区,从而抑制水平向土压力累积。总体而言,裂隙显著改变应力传递与分布模式,表现为上、中部应力释放与底部应力集中,对地基整体稳定性具有不利影响。

3 结 论

- 1) 裂隙显著改变地基的破坏形态,使其由单一的拉裂破坏转变为拉剪复合破坏,呈现裂隙拓展、树枝状裂缝网络及阶梯错动等复杂表面破坏特征。
- 2) 裂隙降低了地基的整体刚度和整体稳定性,促使含裂隙地基先于无裂隙地基沉降,并在荷载作用下产生更大的总沉降量,沉降分布更为不均,地表沉降分布模式呈“V 型”,中心沉降集中并随荷载增加而加剧。
- 3) 裂隙结构对地基内部应力分布特征的影响具有明显的分层效应,竖向应力在上部表现出初期集中、后期稳定,中部承载能力减弱,底部受裂隙影响较

小;而水平应力则呈现底部集中、中上部释放的特征。这种差异性破坏机制引起的传递路径重构与应力集中效应,需在同类型工程设计中予以重点关注。

4) 试验结果表明:当裂隙宽度超过 3.5 mm 时,模型地表已出现明显阶梯状错动,表明此类裂隙极易诱发沉降不均与局部失稳。

5) 通过土工离心模型试验揭示了裂隙黄土地

基在加载过程中的破坏模式、沉降特征与应力响应机制,但仍存在一定局限:所构造裂隙为封闭型,未能充分考虑地下水入渗或雨水作用下的渗透劣化机制。未来可进一步开展水-力耦合条件下的系统对比试验,探讨不同裂隙形态与渗流条件对地基稳定性的影响,以提升研究成果在复杂工程地质条件下的适用性。

参 考 文 献

- [1] 冯立,张茂省,胡伟,等.黄土垂直节理细微观特征及发育机制探讨[J].岩土力学,2019,40(1):235-244.
Feng Li, Zhang Maosheng, Hu Wei, et al. Discussion on microscopic, microcosmic characteristics and developmental mechanism of loess vertical joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 235-244.
- [2] 潘网生,胡向红,卢玉东,等.黄土孔隙、裂隙及其优先流研究进展[J].科学技术与工程,2018,18(8):163-169.
Pan Wangsheng, Hu Xianghong, Lu Yudong, et al. Research progress of pore, fracture and preferential flow for loess[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(8): 163-169.
- [3] 胡长明,胡婷婷,朱武卫,等.干湿循环作用下压实黄土裂隙演化特征[J].长江科学院院报,2024,41(8):96-103,112.
Hu Changming, Hu Tingting, Zhu Wuwei, et al. Evolution characteristics of cracks in compacted loess under drying-wetting cycles [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(8): 96-103, 112.
- [4] 林銓.基于数字图像相关技术(DIC)的土体干缩开裂特性研究[D].南京:南京大学,2020.
Lin Luan. Study on soil desiccation cracking based on digital image correlation (DIC) technique[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [5] 王年香,章为民.土工离心模型试验技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2015:4-22.
- [6] 孙振岳,张嘎,张建民,等.水井抽水引起地基沉降的离心模型试验研究[J].土木工程学报,2008,41(4):67-72.
Sun Zhenyue, Zhang Ga, Zhang Jianmin, et al. Centrifuge modeling of ground settlement due to groundwater pumping[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 67-72.
- [7] 梅源,胡长明,魏弋峰,等.Q2、Q3黄土深壑中高填方地基变形规律离心模型试验研究[J].岩土力学,2015,36(12):3473-3481.
Mei Yuan, Hu Changming, Wei Yifeng, et al. A centrifugal test study of the deformation of high backfill foundation in deep ravine of Q2 and Q3 loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3473-3481.
- [8] 谌文武,徐彦荣.浸水型病害引起黄土地基沉降的离心模型试验及修正双曲线估算法[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(3):333-339,346.
Chen Wenwu, Xu Yanrong. Centrifugal model test and modified hyperbolic estimation method for the influence of water immersion on the settlement of loess foundation[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2019, 55(3): 333-339, 346.
- [9] 王雪艳.碎石桩加固深厚湿陷性黄土地基的试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1164-1170.
Wang Xueyan. Application research on deep collapsible loess foundation treatment by gravel pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1164-1170.
- [10] 张军杰,顾行文,任国峰,等.超大堆载下桩网复合地基变形特性离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊1):212-216.
Zhang Junjie, Gu Xingwen, Ren Guofeng, et al. Centrifugal model tests on deformation characteristics of pile-net composite foundation under super-large loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S1): 212-216.

- [11] 李磊, 汪俊, 黄勇. 具有裂隙的压实黏土衬垫污染物迁移参数研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1 836–1 842.
Li Lei, Wang Jun, Huang Yong. Parameters of contaminant transport of compacted clay liners with fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1 836–1 842.
- [12] Ma Dongdong, Kaund A E, Huang Kun. Investigation on the effects of prefabricated crack and strain rate on uniaxial compressive properties of frozen silty soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020; DOI: 10.1155/2020/8813455.
- [13] 黄鹏, 程永辉, 熊勇, 等. 裂隙扩展对膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J]. 土工基础, 2023, 37(3): 506–511.
Huang Peng, Cheng Yonghui, Xiong Yong, et al. Experimental study on the influence of crack propagation on shear strength of expansive soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2023, 37(3): 506–511.
- [14] 王帅, 胡波, 鲁松, 等. 不同应力路径含裂隙膨胀土力学特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(5): 2 168–2 179.
Wang Shuai, Hu Bo, Lu Song, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil with cracks in different stress paths[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(5): 2 168–2 179.
- [15] 王丽丽, 李宁, 何敏, 等. 基于一种重塑性制样方法的节理黄土力学特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 35–42.
Wang Lili, Li Ning, He Min, et al. Experimental study on mechanical properties of jointed loess based on a remoulding sample method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 35–42.
- [16] 槐江波. 裂隙黄土增湿变形特性及渗透性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
Huai Jiangbo. Experimental study on wetting deformation characteristics and permeability of fissured loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.



作者简介: 梅源 (1983—),男,河南信阳人,博士,教授,主要从事土木工程施工与管理方面的教学与科研工作。E-mail:meiyuan@xauat.edu.cn。