

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.016

多功能透明土模型试验系统研制与应用

刘汉龙^{1,2}, 周航^{1,2}, 陈荣淋³, 齐戈平^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045; 3. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为解决岩土与地下工程灾变破坏机理“看不见、摸不着”的核心难题,自主研发了一套高自动化、集成化、可视化的多功能透明土模型试验系统。该系统集成了自动化混合搅拌与真空饱和预压的透明土材料配制功能、采用激光成像与 CCD 技术的高精度图像采集与测试功能以及多功能模块化试验功能。基于该系统,开展了单桩沉贯、条形基础加载、边坡加载与超浅埋大断面隧道开挖等系列模型试验。试验结果清晰揭示了以下关键规律:沉桩过程桩周与桩尖土体扰动范围受土性主导所呈现的规律,条形基础加载下不同埋深处的内部土体位移分布规律,边坡破坏全过程滑动面的演化规律,以及隧道开挖引发的沉降集中带发展与扰动区扩展特征。该试验系统具备不扰动、不介入、全断面、全过程、可视化、数字化等显著优点,可为揭示滑坡、泥石流、隧道塌方、地面塌陷等岩土与地下工程灾变破坏机理及防控提供全新的技术手段。

关键词:模型试验系统;透明土;土工试验;岩土灾变破坏机理;结构-土相互作用

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2025)05-0136-11

Development and application of multifunctional transparent soil model test system

LIU Hanlong^{1,2}, ZHOU Hang^{1,2}, CHEN Ronglin³, QI Geping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Key Laboratory of Safety and Resilience of Mountainous Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To address the core challenge of the invisible and intangible failure mechanisms in geotechnical and underground engineering disasters, a highly automated, integrated, and visual multifunctional transparent soil model test system was independently developed. This system integrated the functions of automated mixing and vacuum-saturated preloading for preparing transparent soil materials, high-precision image acquisition and testing using laser imaging and CCD technology, and multi-functional modular testing. Based on this system, a series of model tests was conducted, including single pile penetration, strip footing loading, slope loading, and excavation of a super-shallowly buried large cross-section tunnel. The test results clearly reveal the following key patterns: the pattern of soil disturbance around the pile and at the pile tip during pile driving, which is dominated by soil properties; the pattern of internal soil displacement distribution at different burial depths under strip foundation loading; the pattern of sliding surface evolution throughout the slope failure process, and the characteristics of settlement concentration zone development and disturbance zone expansion caused by tunnel excavation. This test system possesses significant advantages, including being non-intrusive, non-intervening. It enables full-section and full-process observation and offers visualization and digital capabilities. The system provides a novel technical approach for revealing the failure mechanisms and developing prevention and control strategies for geotechnical and underground engineering disasters such as landslides, debris flows, tunnel collapses, and ground subsidence.

Key words: model test system; transparent soil; geotechnical test; failure mechanism of geotechnical engineering disaster; soil and structure interaction

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(52027812)

作者简介:刘汉龙(1964—),男,中国工程院院士,教授,博士,主要从事软弱地基加固与桩基工程、环境岩土力学与防灾减灾工程研究。
E-mail:hliuhhu@163.com

通信作者:周航(1987—),男,教授,博士,主要从事软弱地基加固与桩基工程研究。E-mail:zh4412517@163.com

引用本文:刘汉龙,周航,陈荣淋,等.多功能透明土模型试验系统研制与应用[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):136-146.

LIU Hanlong, ZHOU Hang, CHEN Ronglin, et al. Development and application of multifunctional transparent soil model test system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 136-146.

岩土与地下工程灾害的隐蔽性、瞬态性与突发性特征,使得传统室内和现场试验手段难以准确揭示其内在机理。透明土技术通过匹配骨料材料与孔隙流体的折射率实现高透明性,使光线充分穿透土体内部,以观察应力分布与变形特征。该技术最早由 Allersma^[1] 提出,他采用碎玻璃及与之折射率匹配的流体制备透明材料。随后,Iskander 等^[2] 利用硅胶合成透明砂土,发现其力学特性与天然砂土接近。Zhao 等^[3] 进一步探讨了不同粒径分布与相对密度下硅胶透明砂土的动力特性,证实其可有效模拟天然砂土的动力行为。后续研究不断优化透明土的制备工艺与材料性能,其中熔融石英砂以其稳定的物理化学特性逐渐成为透明砂土制配的理想材料^[4-5]。此外,无定形二氧化硅被广泛用于制备透明黏土,直剪、一维固结和三轴试验表明其力学特征与天然黏土一致^[6-9]。

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术和数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 技术是两种常用的图像处理技术。White 等^[10-11] 首先将 PIV 技术引入岩土工程,实现了对土体表面变形的定量分析。相比之下, DIC 技术在固体变形与应变分析方面更具优势。DIC 技术最早由 Peters 等^[12] 在 20 世纪 80 年代初提出,此后 2D-DIC 技术迅速发展,能够有效高精度测量平面内的变形^[13-14]。但其局限性在于要求被测表面为平面且相机摆放严格受限^[15]。为解决以上问题,研究人员提出了一种三维数字图像方法^[16-17],主要集中在解决传统双相机系统的光路问题和提高测量精度^[18]。

透明土技术作为一种新兴的模型试验技术,近年来在土木工程、地质工程和环境工程等领域的应用取得了显著进展。在桩基础研究中,透明土技术被用于探讨不同桩型在沉桩与拔桩过程中土体的位移特征及其影响因素^[19-22]。例如:周航等^[23-24] 开展了 X 形桩的沉桩挤土试验,提出了修正扩孔理论,进一步拓宽了桩基设计的理论依据;刘强等^[25] 和 Xie 等^[26] 分析了不同抗滑桩支护形式和双排抗滑桩与土体的相互作用特征;陈建峰等^[27] 研究了加筋地基在条形基础荷载作用下的位移场演化和滑移破坏过程;许国安^[28] 研制出可以模拟天然软岩的透明土材料,用于分析深部巷道围岩的破坏机理;马少坤等^[29] 模拟了地下水不同渗流形式,精准获取了盾构隧道开挖面失稳区域位移场演化过程,为研究开挖面失稳破坏提供了有效手段。在渗流机理研究方面,蔡松林^[30] 揭示了孔隙通道中的“优先流”规律及大孔隙边坡的水分运移机理。

透明土技术实现了结构-土体变形和破坏机理的动态可视化,有效解决了传统土工试验中无法观察土体内部复杂变化的难题,但现有透明土装置存在成本高、可重复性低等问题。为此,本文自主研发了多功能透明土模型试验系统,可实现岩土与地下工程中变形、渗流和破坏等问题的可视化模拟与分析,具备操作高度自动化、智能化及位移场高精度测量等优势,有效弥补了传统装置在隐蔽性地下工程灾害机理研究中的不足。

1 试验系统组成与关键技术

多功能透明土模型试验系统具备高度自动化、智能化及三维位移测量高精度等优势,在材料制配、图像采集和多功能模块系统方面全面升级,各模块既独立又协同,突破了传统装置的局限性,可提高试验的精度,具备广泛的适用性。多功能透明土模型试验系统装置如图 1 所示。

1.1 透明土材料制配系统

透明土材料制配系统主要由材料混合搅拌模块和真空饱和预压模块组成,其主要功能包括材料运输与自动化操作、材料混合均匀性处理、真空饱和以及预压固结。整体系统形成了一套完整的透明土材料制配流程,可确保材料的质量和试验条件的标准化。

a. 材料混合搅拌模块用于恒温下完成透明土的初步制配,包括液体混合与颗粒撒布,由恒温箱体、模型槽、AB 液混合设备和撒料设备组成。箱体含保温层、空调与温度传感器。模型槽通过平台与滑台自动定位,设置限位开关以提升安全性。AB 液混合设备用于制得混合材料。撒料设备由伺服电机驱动滚刷,配合筛网和定宽板实现均匀铺设。

b. 真空饱和和预压模块用于实现透明土的真空饱和与预压固结,由真空饱和装置和预压固结装置组成。真空泵通过玻璃盖抽出模型槽内空气,使土样真空饱和、无气泡。箱体为矩形结构,适配不同尺寸模型槽,槽口包覆橡胶并配高抛光玻璃盖,确保密封严密。预压装置采用电液伺服加载,通过带孔刚性加载板施加轴向压力,将油排出并回收,以提升固结速率,使土样具备初始抗剪强度和更好稳定性。



图 1 多功能透明土模型试验系统装置

Fig. 1 Multi-functional transparent soil model test system device

1.2 图像采集与测试系统

图像采集与测试系统主要包括激光模块、CCD 相机模块、控制模块与采集模块。其主要原理是利用颗粒材料的散射特性通过 CCD 相机模块捕捉透明土试验过程中的图像来获得土体的变形信息,并通过控制采集模块对相机及激光进行细部调整,通过采集模块传输和收集相关信息。

激光模块主要包括激光器和透镜,前者用于产生和发射单束激光,后者则通过透镜将激光聚焦为垂直的平面光束,以切片方式照射透明土样,形成激光散斑。CCD 相机模块采用 CCD 高速工业相机,相较于传统民用数码相机,CCD 高速工业相机具有高帧率、高图像稳定性、高传输能力及高抗干扰能力等特点。控制与采集模块共同构成试验系统的信息中枢与感知前端,核心功能是保障试验的稳定运行与高精度数据获取,两模块协同运行,有效支撑试验的自动化与智能化。

1.3 多功能模块系统

试验装置的多功能模块系统可以实现非嵌入式、可视化观测土体内部位移场,涵盖了多种地下工程场景的模拟与试验功能模块,如桩基工程模块、隧道工程模块和边坡工程模块等。模块化设计使得试验装置能够适应多种岩土工程需求,可以针对多种相关试验展开模拟研究。

a. 桩基工程模块是透明土试验系统的关键组成部分,主要用于模拟桩体沉贯过程及其与土体的相互作用。模块集成高精密支架、CCD 相机、激光照明设备、沉桩加载仪与控制系统,可模拟多类桩型在不同工况下的响应。加载装置施加精确轴向荷载,结合 DIC 与 PIV 技术,实时观测土体流动与应力分布。配备隔振平台与高光学模型箱,确保图像清晰;可调节沉桩速率、土密度和孔压,能系统揭示桩-土相互作用及失稳机制,为桩基设计提供依据。

b. 隧道工程模块用于模拟隧道开挖过程中的围岩变形与破坏机制,是试验系统的重要功能单元。模块由光学平台、CCD 相机、片光激光器、有机玻璃模型槽与 PIV 图像处理软件组成,可模拟单孔、双孔及交叉隧道等复杂工况。光学平台稳定性高,支持精确成像;模型槽采用高透明有机玻璃制造,配套 TPU 薄膜管实现孔隙液体隔离,采用排液法模拟开挖过程,结构完整且密封性强。激光与相机同步控制,PIV 软件提取围岩变形场,可揭示破坏模式,为隧道施工风险识别提供依据。

c. 基坑工程模块是试验系统中的关键子系统,主要用于模拟基坑开挖过程中的围护结构响应与土体变形行为。模块由数据控制机械手、开挖工具、基坑模型槽和土体运载装置组成,具备高精度控制与自动化能力。机械手能多轴运动,可分层开挖,配备多类工具模拟复杂工况。集成传感器实时采集土压力、位移等数

据,辅助全过程监测。开挖土体经嵌轨小车自动运出,实现循环利用,减少干预。模块可调节开挖路径与土工条件,支撑基坑稳定性与响应研究。

d. 边坡工程模块是试验系统的重要应用单元,主要用于模拟边坡在外荷载作用下的滑移破坏过程。模块通过调配透明土材料折射率、搅拌混合与真空饱和工艺制配高透光透明土,构建可视化边坡模型。采用激光制斑与图像采集技术实时监测土体变形,坡顶荷载步进施加,捕捉边坡从变形到破坏全过程,清晰呈现滑移面演化,可为边坡稳失稳机理研究与工程防护设计提供高精度试验支持。

e. 压力注浆模块是试验系统的重要组成部分,专门用于模拟和研究浆液注入土体的过程,评估注浆在不同工况下的效果及对土体力学特性的影响。注浆系统包括自动升降器、电控阀、搅拌灌浆罐、压力表、计算机、控制器、空压机、镜面底座和注浆管。注浆管为透明亚克力材质,直径按比例选取。升降器以恒速提升注浆管,确保其接近孔中心,出浆口位于注浆面下约 5 mm。底座设反射镜,结合激光形成散斑场,用于观察注浆过程细节与效果。

f. 泥石流冲击模块专用于模拟泥石流对基础结构的冲击过程,研究其动力特性与冲击机制。模块由泥石流槽、变角支架、透明桥墩、转换器、冲击力测量系统与 PIV 系统组成,具备结构灵活、参数可调、测量精度高等特点。泥石流槽设多段斜面与闸门,实现不同坡度下流动模拟。透明桥墩为透明亚克力材质,支持多截面切换,确保测量准确性。冲击力测量系统含双传感器与高速采集单元,实时捕捉冲击响应。PIV 系统追踪颗粒运动与速度场,揭示泥石流冲击演化规律。

g. 水力侵蚀模块是试验系统中专用于研究水流作用下土体侵蚀行为的重要子系统,主要用于模拟渗透、冲刷及颗粒迁移等过程,服务于桥梁桩基、边坡及水下基础等工程场景的侵蚀机制研究。模块由透明渗透仪、流体循环系统、水头控制系统、颗粒收集系统和激光成像系统组成,具备高精度控制与可视化能力。渗透仪采用有机玻璃制作,含滤板与扩散层,以保障水流均匀。流体循环系统维持稳定流场,水头控制系统调节梯度,颗粒收集系统便于统计侵蚀量,激光成像系统实时记录颗粒迁移与变形过程。

2 试验系统工程应用

为揭示透明土在不同加载条件下的土体内部位移场的变化,验证多功能透明土模型试验系统的可行性,阐明透明土在桩基贯入、条形基础加载、边坡加载及隧道开挖等典型工况下的变形破坏模式与响应机制,本文开展了多组可视化模型试验研究。

2.1 试验材料制配及准备

为匹配天然砂土与黏土的力学性能,分别选用熔融石英砂与气相二氧化硅制配透明砂土和透明黏土。根据折射率匹配原理,调整白油比例匹配固体材料。将固体与 AB 混合液加入自动化混合模块,初步制得混合材料。因样品含气泡,透明度差,需将其置入真空饱和预压模块,设定真空度与时间,气泡清除后取出,即得透明砂土与透明黏土。将制配好的透明土样布置于光学平台,开启激光模块并调整位置选定区域,同时开启相机模块,调节光圈与焦距获取清晰图像。试验开始后,同步启动相机采集并记录数据。试验结束后上传数据至处理软件,结合图像算法精确分析变形与位移场。

2.2 试验场景应用

2.2.1 单桩沉桩模型试验

基于透明土技术,选取桩基工程模块开展透明土单桩沉桩模型试验。试验采用透明有机玻璃方形模型槽(150 mm×150 mm×200 mm),四角粘贴透明刻度尺控制填埋厚度和桩位置。同时采用不锈钢制成的圆形桩用于模拟真实状态下的桩,通过缩尺设计桩尺寸,直径 D 为 10 mm,长度为 100 mm,桩中心距槽壁 $6D$ 、桩尖距底部 $3D$,以减少边界干扰。试验中贯入速度为 0.1 mm/s,用以模拟工程中低速沉桩工况。该试验具有良好的通用性,适用于模拟圆桩、螺旋桩等不同桩型,以及松散、密实、饱和等多种地基工况,为桩基承载特性、扰动区识别、贯入力分析等研究提供可靠试验平台。

考虑到黏土和砂土的不同特性,主要关注竖向平面的内部位移场。图 2(a)(b)为黏土条件下不同沉桩深度的竖向平面内土体位移矢量图,可以看出不同沉降深度下,桩周土体整体向斜上方运动;桩尖土体受到挤压向斜下方运动。而沉桩深度 $7D$ 下土体的位移范围和位移幅值均明显大于 $3.5D$,主要原因在于随着沉桩深度的增加,桩体对周围土体的挤压范围扩大,导致更大范围内的土体发生位移。图 2(c)(d)为砂土条

件下不同沉桩深度的竖向平面内土体位移矢量图。在沉桩深度为 $3.5D$ 时,位移矢量场主要集中于桩侧区域,土体的扰动范围较小,位移方向主要表现为向上斜向挤出,桩体附近的土体产生明显的局部扰动,但下部区域位移较小。这主要是由于沉桩深度较浅,桩体主要通过侧摩阻力对周围土体施加影响,导致仅靠近桩侧的砂土发生较明显的侧向挤土效应。当沉桩深度达到 $7D$ 时,砂土的位移范围显著扩大,位移矢量明显增大且分布更广泛,尤其是桩前方(桩体左侧)呈现出更显著的水平向位移矢量特征。

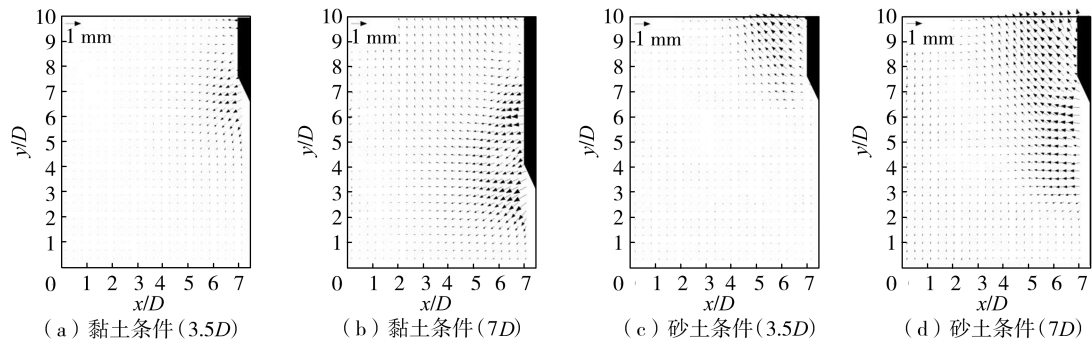


图 2 不同沉桩深度的竖向平面内土体位移矢量图

Fig. 2 Soil displacement vectors in vertical plane at different pile driving depths

图 3 为黏土条件下沉桩深度分别为 $3.5D$ 和 $7D$ 时竖向平面内的归一化土体位移等值线图。沉桩深度为 $3.5D$ 时,土体位移主要集中在桩体周围的局部区域,水平位移等值线主要呈封闭型向桩侧集中分布,且极值出现在桩尖区域;竖向位移也出现相同的趋势,表现为明显的局部挤土效应。这主要是由于此阶段沉桩深度较浅,土体主要受侧向挤压扰动,导致位移场相对集中。而在沉桩深度为 $7D$ 时,位移等值线范围显著扩大,水平位移及竖向位移不仅在桩侧区域明显增加,而且其影响范围延伸至更深层的土体区域。整体而言,随着沉桩深度的增加,黏土内的水平和竖向位移分布区域扩大且幅值显著增大。

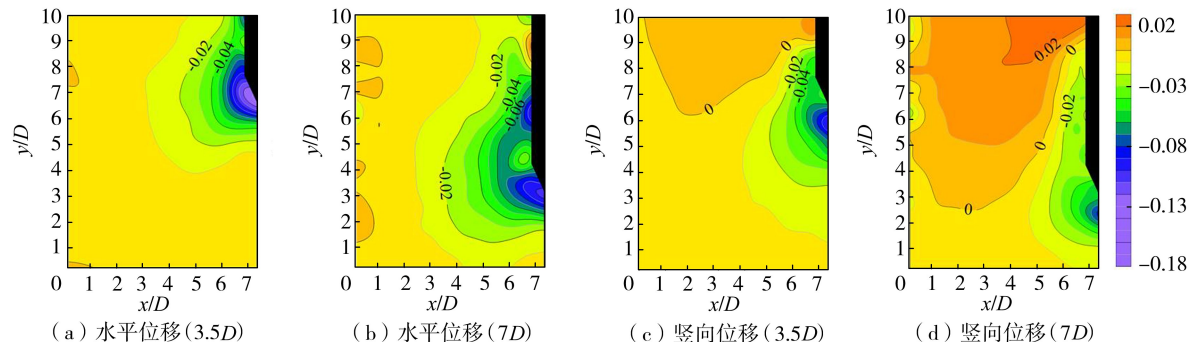


图 3 黏土条件下不同沉桩深度的竖向平面内归一化土体位移等值线

Fig. 3 Normalized soil displacement contour lines in vertical plane at different pile driving depths under clay conditions

图 4 为砂土条件下沉桩深度分别为 $3.5D$ 和 $7D$ 时竖向平面内的归一化土体位移等值线图。沉桩深度为 $3.5D$ 时,砂土的位移等值线集中分布于桩侧区域,位移极值区域紧邻桩的侧前上方,水平位移以向外侧挤土为主,竖向位移表现为明显的上隆特征。此时位移等值线分布较为局限,反映了浅层沉桩主要以桩体周围上部区域的侧向扰动为主。当沉桩深度达到 $7D$ 时,土体位移的范围和幅值显著增大。水平位移的极值区域显著扩展并延伸至桩前更大范围内,且位移强度明显提高,形成较为连续的水平向挤压变形区;竖向位移场的上隆特征更加明显。

综上所述,在黏土和砂土条件下进行沉桩,桩周土体整体向斜上方运动,桩尖土体受到挤压向斜下方运动。此外,可以发现黏土条件下的水平和竖向位移要明显小于砂土条件下的对应位移。这主要是因为黏土具有较高的孔隙水压力和较低的渗透性,当桩穿越黏土时,桩的插入会引起土体的固结和排水作用,产生一定的孔隙水压力,使得土体不容易发生大幅度的位移。此外,黏土的剪切强度通常较大,抗压能力较强,因此桩周土体的位移会相对较小。而砂土颗粒之间缺乏强固的胶结力,其摩擦力较低,且相对于黏土,砂土的孔隙空间较大,渗透性较强。在沉桩过程中,砂土的颗粒容易发生位移,且土体的抗压性相对较弱,容易发生较大的位移。

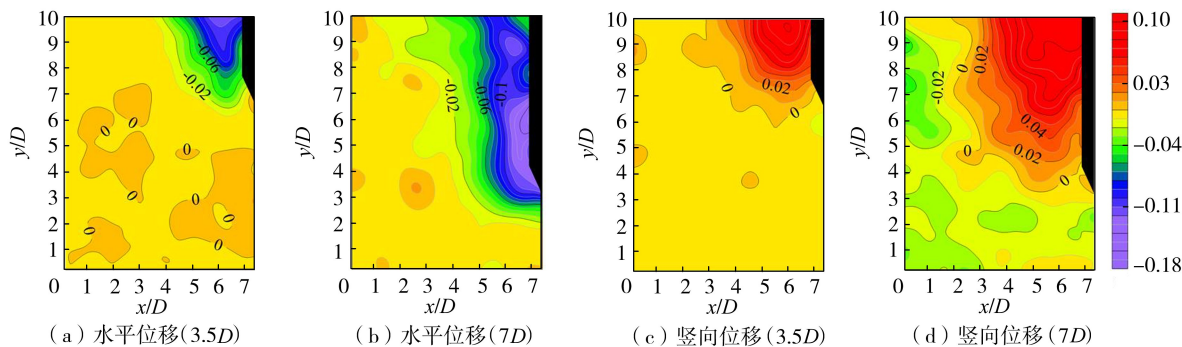


图 4 砂土条件下不同沉桩深度的竖向平面内归一化土体位移等值线

Fig.4 Normalized soil displacement contour lines in vertical plane at different pile driving depths under sandy soil conditions

2.2.2 条形基础模型试验

基于桩基工程模块,开展条形基础受荷作用下的透明土模型试验研究,分析浅基础加载引起的土体应变场分布及变形特征,揭示地基承载机制与基础-土体相互作用规律。为保证透明效果,采用透明有机玻璃方形模型槽(300 mm×200 mm×250 mm),四角粘贴透明刻度尺以控制填埋厚度。基础为透明亚克力长条形矩形截面(200 mm×20 mm×20 mm),底面打磨以模拟混凝土与土体接触。试验使用的透明土为透明黏土,基础顶部设有与透明土桩基工程模块相连接的装置配合透明土加载装置施加竖向荷载。试验设置埋深比(条形基础埋深 d 与宽度 B 的比值)分别为 0、0.5、1 的 3 个工况,加载速度 0.05 mm/s,加载至 20 mm 结束。

图 5 为条形基础不同埋深下土体的位移矢量图,可见不同埋深条件下位移矢量场的变化趋势大体相同,都呈现出基础底部向下移动、侧边向斜上方移动的趋势。当基础为地表基础($d/B=0$)时,土体位移范围较小,表现出向外侧挤土和竖向沉降变形;当埋深比增大到 0.5 时,土体位移范围有所增大,位移主要还是集中在基础底部和两侧;当埋深比进一步增大至 1 时,土体位移范围进一步扩大,位移更加集中在基础周围区域,表现出显著的局部挤压与沉降变形特征。

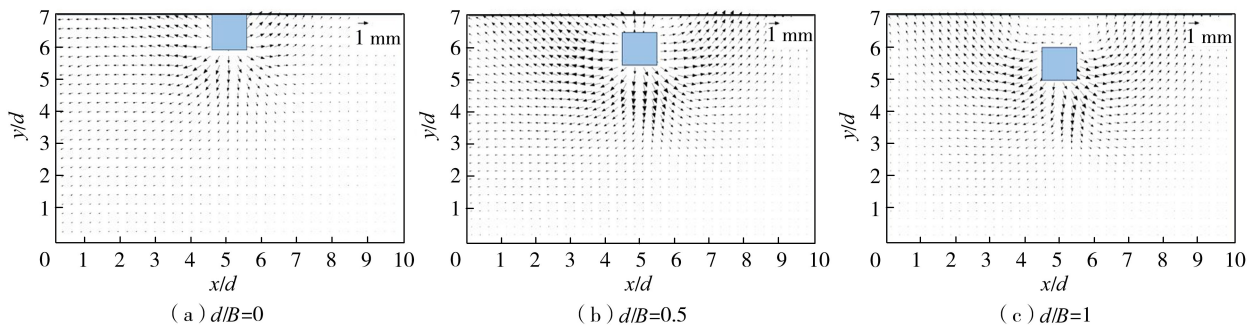


图 5 不同埋深下土体位移矢量

Fig.5 Soil displacement vectors at different burial depths

图 6 为条形基础在不同埋深下归一化土体位移等值线。当基础位于地表($d/B=0$)时,土体水平位移主要集中在基础两侧呈对称分布,表现为向外的挤压变形,位移极值主要分布在基础下方两侧的夹角处,竖向位移则集中于基础底部并向上传播,形成局部的沉降漏斗,表明荷载主要集中于基础附近并传递至上部土体,扰动范围有限;随着基础埋深比增大至 0.5,土体水平和竖向位移的幅值和分布范围明显扩大,水平位移区向两侧延展,竖向沉降区向更深层扩展,沉降漏斗形态更加清晰,反映出荷载传播路径加深且扰动区域增大;进一步增大埋深比至 1 后,位移场继续扩大,水平位移表现出更强的侧向扩散趋势,竖向位移极值出现在基础下方深层区域,沉降变形区更加宽广,显示基础荷载已由浅层传递逐渐转向深层土体响应为主。综合分析可知,随着基础埋深的增加,土体的受力变形范围持续扩大,受力强度持续增强,基础与土体相互作用显著增强。

造成这种现象的原因是随着基础埋深的增加,土体对基础产生的侧向与竖向约束显著增强,荷载在土体中的传递路径随之改变。对于地表基础,荷载主要沿两侧向外扩散,土体自由度大,应力容易在浅层范围内

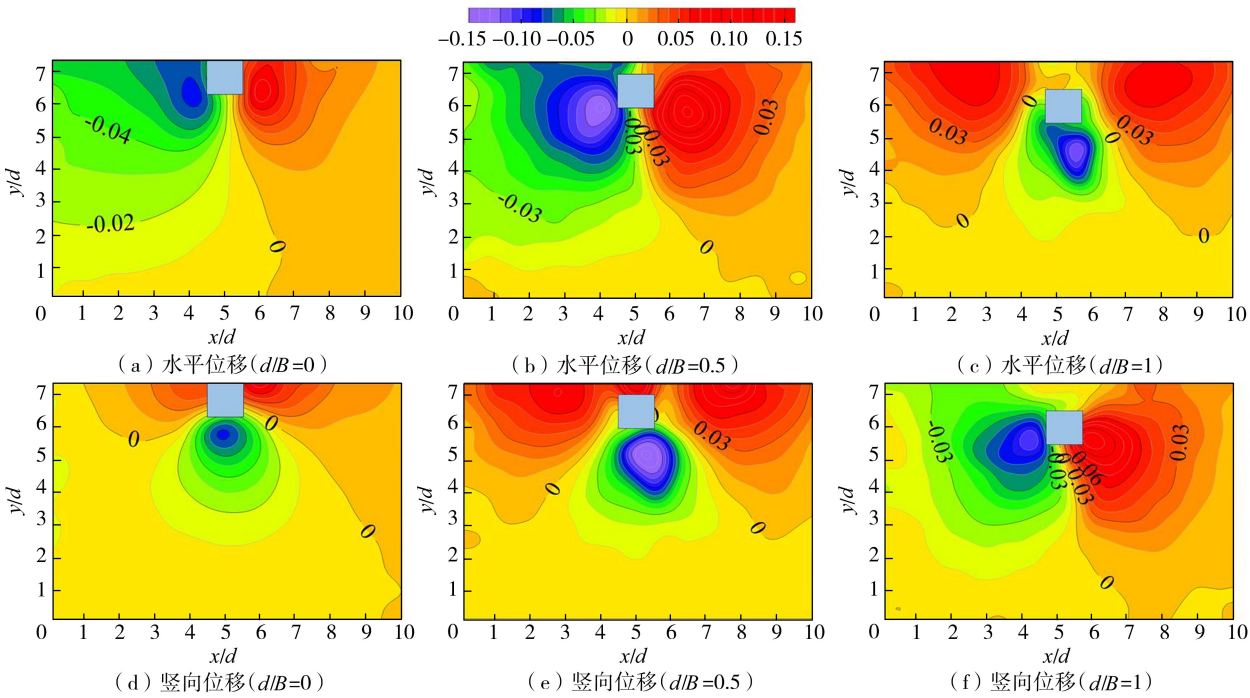


图 6 不同埋深下归一化土体位移等值线

Fig. 6 Normalized soil displacement contour lines at different burial depths

释放,形成局部挤压变形和沉降漏斗;而当基础埋入一定深度后,周围土体形成包裹约束,限制应力向外扩散,迫使荷载更多向深层传播,引起下方土体更大范围的竖向沉降和剪切变形。同时,埋深增大会增强基础的嵌固作用,接触界面处的剪切位移增大,水平位移呈现出更明显的侧向扩展趋势。因此,基础埋深的增加引起了土体应力扩散路径的增大以及约束增强,最终导致位移范围扩大、沉降区加深且变形更剧烈的结果。

2.2.3 边坡模型试验

基于边坡工程模块,开展坡顶加载工况下的透明土边坡模型试验研究,分析外部荷载作用引起的边坡失稳过程与滑动破坏机制。为满足透明土模型试验的透明效果,采用透明有机玻璃方形模型槽(600 mm×100 mm×500 mm);为弱化侧壁约束,在模型槽边界涂抹润滑油以减小边界效应。按原型几何坡度以 1 : 100 相似比构筑模型边坡(坡面倾角约 30°)。试样为透明胶结土(透明黏土与透明砂土按比例配制),先固结后手工切坡得到目标坡型。通过边坡工程模块,利用加载板以 0.05 mm/s 的加载速率对坡顶施加载荷,整体试验装置如图 7 所示。图 8 为边坡模型试验在加载过程中的荷载-位移曲线(图中对位移通过坡顶长度 L 进行归一化处理)。曲线整体变化趋势清晰,可分为弹性增长、屈服破坏和残余承载 3 个阶段。试验中,荷载随位移先缓慢线性增长,在 $x/L \approx 0.045$ 达到峰值,极限承载力为 17~18 kPa,此时边坡整体进入失稳状态并发生滑动破坏,曲线出现明显突降。破坏后,荷载仍可重新上升,表明土体具备一定的残余承载能力,但波动幅度明显,结构整体刚度已降低。边坡承载力达到峰值后迅速下降,是典型的滑坡破坏表现。

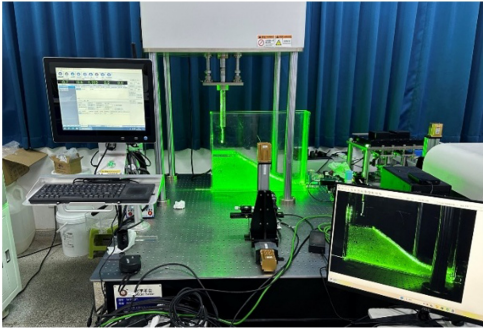


图 7 边坡模型试验装置

Fig. 7 Slope model test device

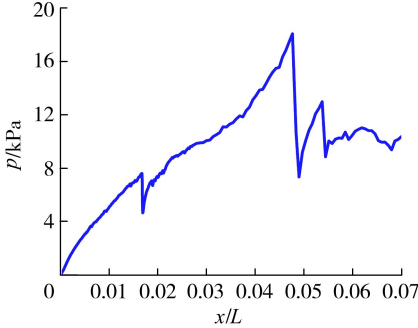


图 8 边坡模型试验的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of slope model test

图 9 为边坡模型坡顶加载过程中不同加载位置($x/L=0.02,0.04,0.045,0.07$)的土体位移矢量分布,用于分析滑坡过程中的应变演化与破坏机制。随着位移的增大,土体位移矢量逐渐增大,变形区域范围不断扩大,体现出典型的由局部变形向整体滑移发展的演化过程。当位移较小($x/L=0.02$)时,位移矢量集中分布于坡顶局部区域,长度较小,反映出加载初期土体仍处于弹性响应阶段,仅发生局部微小变形。当 $x/L=0.04$ 时,位移矢量明显增大,变形区域向坡体中部和下部扩展,土体内部已出现剪应变集中的趋势,表明剪切带逐渐萌生。当 $x/L=0.045$ 时,坡体内剪切带形态趋于清晰,位移矢量在局部区域迅速增大,呈现出沿潜在滑动面集中发展的特征。当 $x/L=0.07$ 时,坡体整体位移显著增强,位移矢量沿滑动面呈连续分布,反映出滑坡已发展为贯通性破坏。

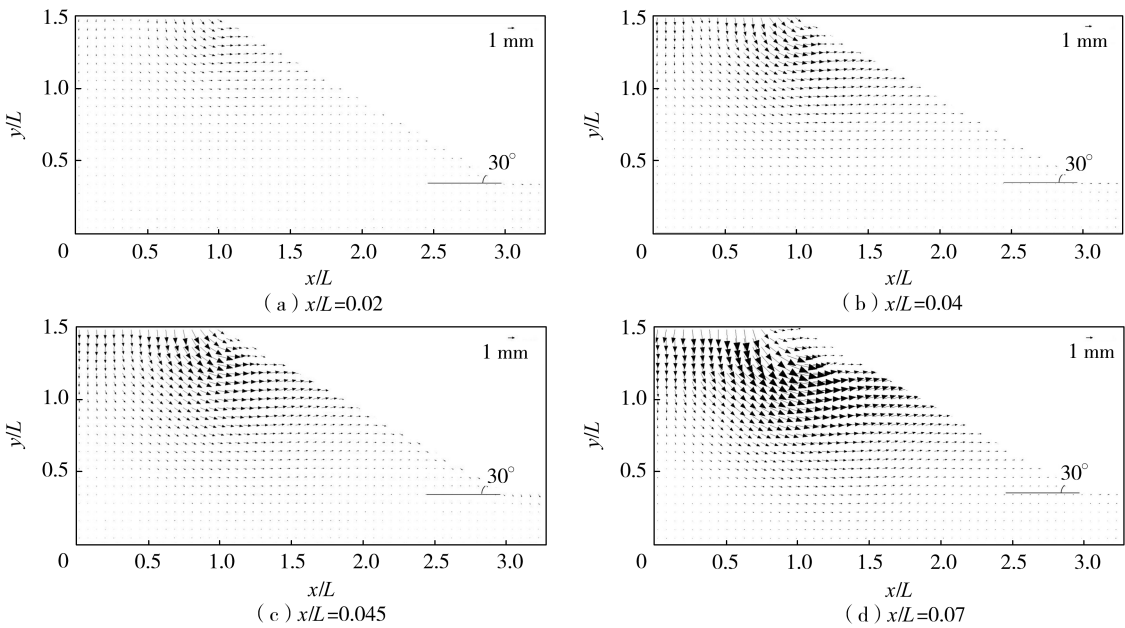


图 9 不同加载位置的土体位移矢量

Fig. 9 Soil displacement vectors at different loading positions

图 10 为边坡模型在不同加载位置($x/L=0.02,0.04,0.045,0.07$)的归一化土体位移等值线,包括水平位移与竖向位移两个方向,通过对比分析可揭示边坡在加载过程中土体变形的演化过程与潜在滑移机制。结果表明,当 $x/L=0.02$ 时,水平和竖向位移场集中分布于坡顶局部区域,变形范围较小,反映出加载初期土体处于弹性响应阶段,整体结构稳定,仅在加载点周围产生微弱扰动。当 $x/L=0.04$ 时,水平位移等值线显示出明显的向坡体下方扩展趋势,竖向位移在坡体上部区域出现局部负值区,表明应力已传导至坡体内部,剪切变形初步发展。当 $x/L=0.045$ 时,水平位移场在坡体内部形成大范围同心环状分布,极值显著增大,竖向位移场出现显著负梯度带,坡体内部形成明显的剪切带走向,预示坡体正处于失稳状态。最终,在 $x/L=$

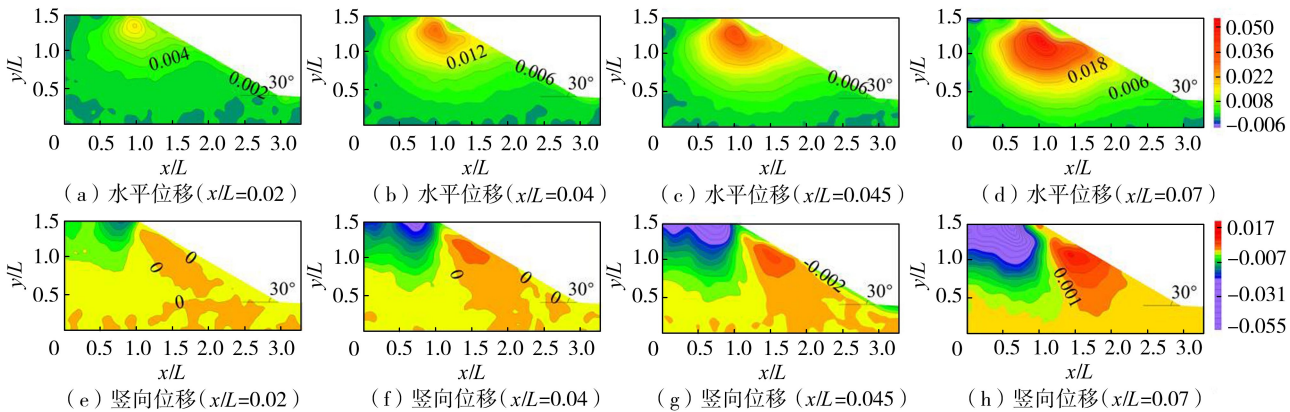


图 10 不同加载位置的归一化土体位移等值线

Fig. 10 Normalized soil displacement contour lines at different loading positions

0.07 处水平位移和竖向位移场均显示出大范围变形,滑动面轮廓清晰可辨,坡体呈现整体滑坡破坏特征。

综上所述,在边坡加载过程中,随着加载位置逐渐下移,荷载作用点逐步接近坡体潜在滑移面,导致原有的应力平衡被打破,土体内部的应力发生重新分布。加载初期,荷载主要作用于坡顶浅表区域,扰动范围有限,土体处于弹性响应阶段,变形局部且可控。随着加载位置逐步下移,应力向坡体中下部扩散,剪应力逐渐积聚,引起土体局部剪切变形,并在坡体内部形成初始剪切带。当加载位置达到临界范围时,剪切应变进一步集中,局部屈服破坏带逐渐贯通形成连续滑移面,坡体失稳趋势显著增强。最终,当坡顶荷载足够大时,坡体整体沿已形成的滑动面发生滑移,表现为明显的整体滑坡破坏特征。

2.2.4 隧道模型试验

基于隧道工程模块,开展超浅埋大断面暗挖隧道的透明土模型试验研究,分析超浅埋大断面暗挖隧道引起的地层位移场、隧道变形与地表沉降,揭示地层变化规律。试验采用有机玻璃方形模型槽(110 mm×400 mm×320 mm),四角粘贴透明刻度尺控制填埋厚度与隧道位置。在模型箱侧壁开设和隧道模具相同大小的洞口,便于拉拔隧道模具。试验使用的透明土为透明砂土。隧道结构采用定制的拱形隧道双层管状模具模拟,根据其相应功能命名为隧道临时结构和隧道模型,为了减小模型试验中边界效应对试验结果带来的不利影响,隧道模型到模型箱边界的距离均需达到 3~5 倍隧道洞径(隧道宽高 $s \times h$ 为 60 mm×72 mm)。试验中通过缓慢抽离临时隧道结构,在土体中造成一定比例的地层损失来模拟隧道开挖过程,试验外拔速度为 0.5 mm/s。

图 11 为隧道模型在不同开挖进度(20%、60%、100%)时的土体位移矢量分布,直观反映了土体在开挖过程中的变形响应与空间演化规律。通过对比可以发现,不同开挖进度下的隧道周围和上部土体都出现了明显下沉的趋势,且随着隧道开挖进度的逐步增大,土体位移不断加剧,扰动范围持续扩大。当开挖进度为 20%时,位移矢量主要分布于隧道拱部及侧墙近区;当开挖进度增大至 60%时,位移范围明显增大,变形区域向拱肩、拱顶及拱脚延展;在开挖进度达到 100%时,土体扰动范围达到最大。

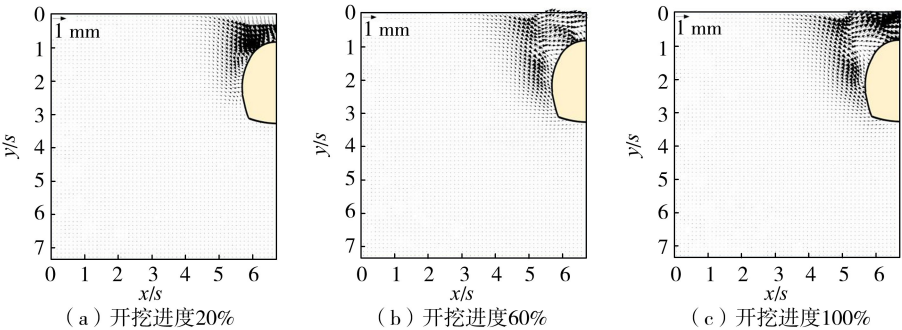


图 11 不同开挖进度时的土体位移矢量

Fig. 11 Soil displacement vectors under different excavation degrees

图 12 为隧道模型在不同开挖进度(20%、60%、100%)时竖直平面内的归一化土体位移等值线,直观反映了开挖扰动下土体位移的分布特征与演化趋势。当开挖进度为 20%时,变形区域范围较小,土体变形主要集中在隧道拱顶和拱肩区域,从竖向位移可以看出隧道上部主要呈现下陷的趋势;当开挖进度从 20%增大到 60%时,水平与竖向位移幅值进一步增大,水平位移沿隧道上方呈弧形扩展特征,竖向位移在拱顶上方逐渐形成沉降集中带,隧道扰动向上部土体扩散;在开挖进度达到 100%时,水平位移范围进一步扩大,拱肩和拱顶附近形成明显的变形集中区,竖向位移分布表现为明显的不均匀沉降。

造成上述不同开挖进度条件下土体位移分布特征变化的原因是隧道开挖后,原有的地层应力平衡被破坏,周围土体的应力发生释放和重新分布。随着水平开挖深度的增加,隧道周围土体所受扰动范围扩大,应力释放更为剧烈,导致周围土体向隧道方向位移并引起更大范围的土体不均匀沉降。同时,由于隧道开挖后,顶部与侧壁支撑作用减弱,原本由隧道部分土体承受的上覆土体自重向下传递,随着开挖深度增加,失去支撑作用的区域扩大,更多的上覆土体重力荷载直接作用于下部土体,进一步加剧了位移范围与幅度。因此,隧道开挖深度增加后,土体应力释放以及重力作用增强共同导致了位移区域逐步扩大、土体沉降范围逐渐扩展的现象,这符合实际工程中隧道开挖的情况。

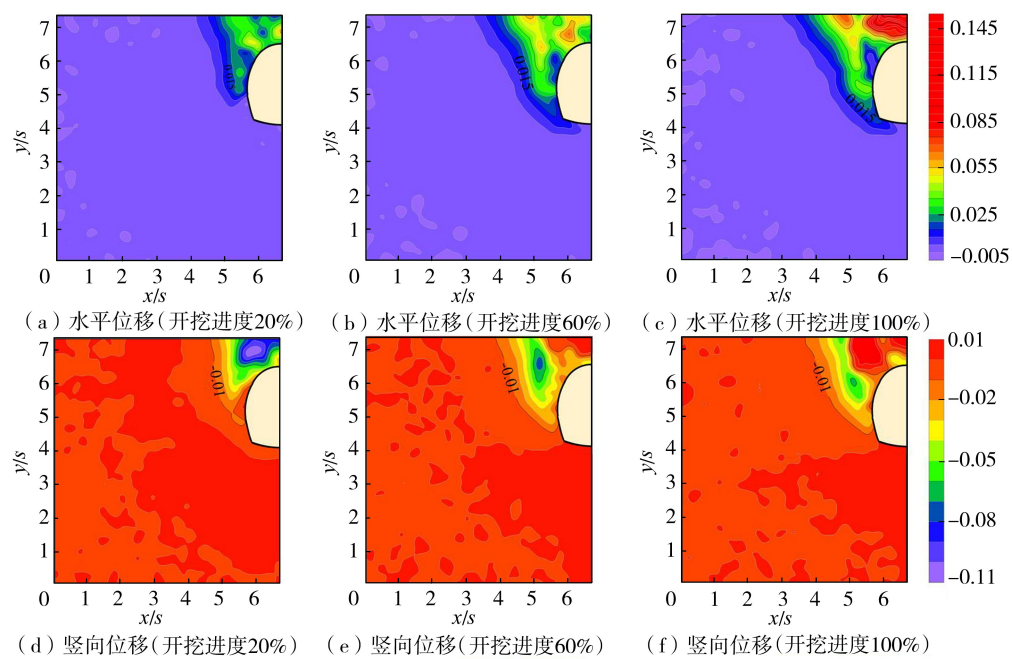


图 12 不同开挖进度时竖直平面内的归一化土体位移等值线

Fig. 12 Normalized soil displacement contour lines in vertical plane under different excavation degrees

3 结 论

a. 自主研发了集透明土材料制配、高精度图像采集与测试、多功能模块化试验于一体的多功能透明土模型试验系统,实现了土体内部变形、渗流及破坏过程的全过程、非扰动、可视化观测,突破了传统土工试验“看不见、摸不着”的瓶颈,为岩土与地下工程灾变破坏机理可视化研究提供了一种全新的技术平台和研究方法。

b. 基于该系统,开展了单桩沉贯、条形基础加载、边坡加载和超浅埋大断面隧道开挖等透明土模型试验,系统实现了土体内部变形全过程的可视化分析。沉桩试验揭示了土性对扰动范围与强度的影响;条形基础试验展现了不同埋深下的位移分布规律;边坡加载试验捕捉到滑动面形成及整体滑移过程;隧道开挖试验明确了沉降集中带及扰动区的扩展趋势。试验结果充分验证了系统在多类岩土工况中的适用性和精度,为岩土工程稳定性分析与灾害机制研究提供了有效技术支撑。

参考文献:

[1] ALLERSMA H G B. Photo-elastic stress analysis and strains in simple shear[C]//IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials. Rotterdam;Balkema,1982;345-353.

[2] ISKANDER M G,SADEK S,LIU Jinyuan. Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2002,2(4) :13-26.

[3] ZHAO Honghua,GE L. Investigation on the shear moduli and damping ratios of silica gel[J]. Granular Matter,2014,16(4) :449-456.

[4] GANIYU A A,RASHID A S A,OSMAN M H. Utilisation of transparent synthetic soil surrogates in geotechnical physical models: a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2016,8(4) :568-576.

[5] GUZMAN I L,ISKANDER M. Geotechnical properties of sucrose-saturated fused quartz for use in physical modeling[J]. Geotechnical Testing Journal,2013,36(3) :448-454.

[6] CHANEY R C,DEMARS K R,WELKER A L. Applied research using a transparent material with hydraulic properties similar to soil[J]. Geotechnical Testing Journal,1999,22(3) :266-270.

[7] PINCUS H J,ISKANDER M G,LAI J,et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils [J]. Geotechnical Testing Journal,1994,17(4) :425-433.

[8] ISKANDER M G, LIU Jinyuan, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(3) :262-273.

[9] ISKANDER M. Geotechnical properties of transparent silica powders[J]. Canadian Geotechnical Journal,2015,39(1):111-124.

[10] WHITE D,TAKE W A,BOLTON M,et al. A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry, and PIV image analysis[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Lisse: CRC Press,2001:539-542.

[11] WHITE D,TAKE W,BOLTON M. Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis [C]//Proceedings of the International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Boca Raton: CRC Press,2001:997-1002.

[12] PETERS W H,RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering,1982,21(3): 427-431.

[13] SKARŻYŃSKI L,KOZICKI J,TEJCHMAN J. Application of DIC technique to concrete: study on objectivity of measured surface displacements[J]. Experimental Mechanics,2013,53(9):1545-1559.

[14] PALANCA M,TOZZI G,CRISTOFOLINI L. The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review[J]. International Biomechanics,2016,3(1):1-21.

[15] 齐建康. 全景数字图像相关法及在管状结构变形测量中的应用[D]. 淄博: 山东理工大学,2023.

[16] LEE D H,KWEON I S,CIPOLLAA R. Single lens stereo with a biprism[J]. IAPR Workshop on Machine Vision Applications, 1998,11:17-19.

[17] 潘兵,谢惠民,李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学,2007,22(6):556-567. (PAN Bing,XIE Huimin,LI Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface[J]. Journal of Experimental Mechanics,2007,22(6):556-567. (in Chinese))

[18] GENOVESE K,CASALETTO L,RAYAS J A,et al. Stereo-digital image correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. Optics and Lasers in Engineering,2013,51(3):278-285.

[19] 张婉璐,陈永辉,齐昌广. 利用透明土模型试验的细长桩压曲研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2016,36(2):66-72. (ZHANG Wanlu,CHEN Yonghui,QI Changguang. Research on buckling of slender pile based on transparent soil model test[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2016,36(2):66-72. (in Chinese))

[20] 邓友生,李龙,赵衡,等. 基于透明土的梅花桩沉桩挤土效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):205-213. (DENG Yousheng,LI Long,ZHAO Heng,et al. Plum-blossom pile penetration effect based on transparent soil[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2022,49(7):205-213. (in Chinese))

[21] 李佳. 预制螺钉桩竖向承载透明土模型试验与计算分析[D]. 重庆:重庆大学,2021.

[22] WANG Zhongtao,LUO Guangyu,KONG Gangqiang,et al. Centrifuge model tests on anchor pile of single point mooring system under oblique pullout load using transparent sand[J]. Ocean Engineering,2022,264:112441.

[23] 周航,袁井荣,刘汉龙,等. 基于球形硅微粉的新型透明黏土基本力学特性试验[J]. 中国公路学报,2021,34(9):172-180. (ZHOU Hang,YUAN Jingrong,LIU Hanlong,et al. Basic mechanical properties of transparent clay made from spherical silica powder: an experimental study[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(9):172-180. (in Chinese))

[24] 周航,孔纲强,崔允亮. 基于透明土的 XCC 桩沉桩挤土效应模型试验及其理论研究[J]. 土木工程学报,2017,50(7):99-109. (ZHOU Hang,KONG Gangqiang,CUI Yunliang. Model test and theoretical study on XCC pile penetration effect based on transparent soil[J]. China Civil Engineering Journal,2017,50(7):99-109. (in Chinese))

[25] 刘强,吴能森,黄志波,等. 抗滑桩加固二元结构边坡可视化模型试验[J]. 林业工程学报,2023,8(2):172-179. (LIU Qiang,WU Nengsen,HUANG Zhibo,et al. Visualization model tests of dual-structure slope reinforced by anti-sliding piles[J]. Journal of Forestry Engineering,2023,8(2):172-179. (in Chinese))

[26] XIE Qiang,CAO Zhilin,SHI Xiaokang,et al. Model test of interaction between load-caused landslide and double-row anti-slide piles by transparent soil material[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2021,46(5):4841-4856.

[27] 陈建峰,许强,郭鹏辉,等. 基于透明土技术的加筋地基模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(3):330-335. (CHEN Jianfeng,XU Qiang,GUO Penghui,et al. Model tests of reinforced foundation based on transparent soil technique [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2017,45(3):330-335. (in Chinese))

[28] 许国安. 深部巷道围岩变形损伤机理及破裂演化规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.

[29] 马少坤,韦榕宽,邵羽,等. 基于透明土的隧道开挖面稳定性三维可视化模型试验研究及应用[J]. 岩土工程学报,2021,43(10):1798-1806. (MA Shaokun,WEI Rongkuan,SHAO Yu,et al. 3D visual model tests on stability of tunnel excavation surface based on transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(10):1798-1806. (in Chinese))

[30] 蔡松林. 降雨入渗下土壤水分运移机理的透明土试验模拟[D]. 福州:福州大学,2019.