

文章编号:1672-3961(2025)04-0118-09

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2025.046

# 渗流作用下土-结构接触面变形特性试验研究

李光<sup>1</sup>,刘健<sup>2</sup>,周立志<sup>2</sup>,李霄汉<sup>2</sup>,吕高航<sup>2</sup>,解全一<sup>2\*</sup>

(1.山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心,山东 济南 250014; 2.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002)

**摘要:**为了解决渗流作用下土-结构接触面变形条件难判定的问题,本研究设计了土-结构接触面渗流变形试验装置,研究渗流作用下接触面变形、土体表面变形、土体内部变形分布规律以及随水力坡降增加的演化规律,分析了不同接触面和土质对接触面渗流破坏的影响机制。结果表明:(1)试验中接触面水平方向的变形呈对称分布,垂直于接触面方向上的土体内部变形随距离增加呈现非线性减小的趋势;(2)土-结构接触面渗流破坏过程分为稳定、过渡和破坏3个阶段,接触面变形、接触面渗透系数在3个阶段分别呈现线性增大、非线性增大和激增的趋势;(3)砂土-结构接触面渗流破坏时的应变普遍为9.0%左右,粉土-结构接触面渗流破坏时的应变为7.9%~9.1%,低液限黏土-结构接触面渗流破坏时的应变为5.2%~6.5%。

**关键词:**渗流;土-结构接触面;变形;演化规律;水力梯度

**中图分类号:**TU43

**文献标志码:**A

**引用格式:**李光,刘健,周立志,等. 渗流作用下土-结构接触面变形特性试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(4):118-126.

LI Guang, LIU Jian, ZHOU Lizhi, et al. Experimental study on deformation characteristics of soil-structure interface under seepage conditions[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4):118-126.

## Experimental study on deformation characteristics of soil-structure interface under seepage conditions

LI Guang<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, ZHOU Lizhi<sup>2</sup>, LI Xiaohan<sup>2</sup>, LÜ Gaohang<sup>2</sup>, XIE Quanyi<sup>2\*</sup>

(1. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that it was difficult to determine the deformation condition of the soil-structure interface under seepage, an experimental device for studying seepage-induced deformation at this interface was designed. This study investigated the distribution characteristics of interface deformation, soil surface deformation, and internal soil deformation, as well as their evolution with increasing hydraulic gradient under seepage action. The influence mechanism of different interface types and soil types on interface seepage failure was analyzed. The main conclusions were as follows: (1) the horizontal deformation of the contact surface was symmetrical in the test, the internal deformation of soil in the direction perpendicular to the contact surface showed a nonlinear decreasing trend with the increase of distance; (2) The seepage failure process of soil structure interface could be divided into three stages, stability, transition and failure, the deformation of the contact surface and the permeability coefficient of the contact surface showed the trend of linear increase, nonlinear increase and sharp increase in the three stages respectively; (3) The strains at the sand-structure interface were generally about 9.0%, strains at the silt-structure interface ranged from 7.9% to 9.1%, while strains at the low-liquid-limit clay-structure interface ranged from 5.2% to 6.5%.

**Keywords:** seepage; soil-structure contact surface; deformation; evolution law; hydraulic gradient

收稿日期:2025-04-08

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2022DKX001);泰山学者工程专项经费资助项目(tstp20221153)

第一作者简介:李光(1969—),男,河北景县人,高级工程师,主要研究方向为水利结构安全分析。E-mail:liguangylzx@163.com

\*通信作者简介:解全一(1992—),男,山东淄博人,副研究员,博士,主要研究方向为土石堤坝风险感知。E-mail:xiequanyi@sdu.edu.cn

## 0 引言

土-结构接触面广泛分布于水利工程的各种结构中,如土石坝与混凝土穿坝涵管、堤防与穿堤涵闸、防渗墙与坝基接触面等<sup>[1-3]</sup>。土-结构接触面是两种介质的过渡区,属于工程薄弱面,在渗流作用下易发生较大变形及颗粒冲蚀破坏<sup>[4]</sup>。美国的Teton坝、Baldwin Hills坝,中国的沟后水库、八一水库等土石坝的溃坝,都是由于土石坝中的土-结构接触面在渗流作用下发生颗粒冲蚀所致,造成了不可估量的人员伤亡和经济损失<sup>[5-8]</sup>。相关统计表明,由于接触面渗流破坏引起的溃坝总数量占溃坝总数的8.46%<sup>[9]</sup>。

土-结构接触面在渗流作用下的变形一直是水利行业的研究热点。水利工程中的接触面设计重点关注接触面的渗流破坏水力梯度。接触面破坏水力梯度主要依赖于试验获取,根据试验对象可分为特定结构模型试验和土-结构渗流模拟试验2类。文献[10-13]开展了无黏性砂土板桩墙的渗流破坏试验,研究了板桩墙的入土深度、土的性质等因素对基坑抗渗强度的影响,提出了砂土-板桩墙接触面的渗透破坏模式;文献[14-19]开展了防渗墙与堤坝接触面的渗流破坏试验,研究了防渗墙对于阻止渗流通道贯通作用机理。上述研究可以有效揭示特定的土-结构接触面在渗流作用下的破坏机制,但是难以进行大范围推广。因此,大量学者对于土-结构接触面渗流作用下的破坏问题,开发了多类渗流破坏试验装置,分析不同水力条件下接触面上土体颗粒的冲蚀-破坏过程。文献[20]开展了砂砾-结构接触面的渗流破坏试验,试验采用的设备为圆柱形,分析了接触面渗流破坏过程中渗透系数的变化与颗粒孔隙之间的规律;文献[21-26]通过自行研制的竖向或者水平向渗透仪,研究了不同土层接触面的渗流破坏现象。但是,以上设备主要针对对不同土层之间的接触渗流问题,主要用来研究渗流破坏的水力坡降,未能分析破坏过程中接触面的变形形态及变形条件。

大量事故案例表明:土-结构接触面的渗流破坏过程异常迅速<sup>[27-29]</sup>。土-结构接触面一旦达到破坏水力条件,将在短时间内形成贯通的渗流通道<sup>[30-32]</sup>。但是,在渗流破坏前的变形情况一直未能得到系统的研究,导致接触部位的监测预警问题一直未能解决。因此,本研究设计了土-结构接触面渗流变形试验装置,研究了渗流作用下接触面变形、土体表面变形、土体内部变形分布规律以及随

水力坡降增加的演化规律,研究成果可为水利工程中土-结构接触面处理及监测预警提供理论和数据支撑。

## 1 土-结构接触面渗流破坏试验

### 1.1 土-结构接触面渗流破坏试验装置

土-结构接触面渗流破坏有别于传统的管涌、流土等渗流破坏模式。本研究采用自行设计的土-结构接触面渗流破坏试验装置,该装置整体由有机玻璃制作而成。水流从该试验装置的下部进水口进入,依次经过稳流室和渗流破坏室,从试验装置的上部出水口流出。稳流室为方形,采用均布打孔的有机玻璃板,分为两层,其中下层充满水,上层装填粗砂,防止水流对土体的直接冲蚀。稳流室顶端设测压管接口,在稳流室充水过程中,该接口起到排除空气的作用,试验过程中,该接口与外部测压管相连,用于测量土体底部水头。渗流破坏室采用半圆形设计,其直径部分构成土-结构接触面。该设计确保侧壁至接触面中心线的径向距离相同,从而准确界定接触面的实际影响范围。渗流破坏室的半圆形侧壁上设置了宽度为2 cm的圆弧挡板,保证在渗流破坏的过程中半圆形侧壁处的土体不发生变形。试验采用半圆柱体试样,几何尺寸为:直径400 mm,高度220 mm。

### 1.2 土-结构接触面渗流破坏监测系统

土-结构接触面渗流破坏过程中涉及土体和渗流两种参数的变化,分别设置传感设备监测接触面渗流破坏过程中的土体变形参数和渗流参数。土体变形参数主要包括土体表面变形、土体内部变形和接触面变形,分别采用激光测距仪、光栅位移传感器和数码相机进行量测;渗流参数主要包括流量、土体底面水头,其中流量在渗流出口处采用量筒量测的方式进行监测,土体底面水头采用测压管进行量测。

为获得接触面变形参数,在试样制作过程中将部分土体试样采用红色染料进行染色处理,试样中染料的质量为土体干质量的1%。试样制作时,红色土体与原色土体交替填筑。通过相机拍摄土-结构接触面渗流破坏过程中不同水力梯度下的照片。采用Gatedate软件识别接触面上染色土体与原色土体交界面处的变形。

### 1.3 土-结构接触面渗流变形试验材料

#### 1.3.1 试验土样

为综合考虑土-结构接触情形,试验选用3种水利工程施工中常用的土料:砂土、粉土和低液限黏土。以上3种材料的粒径分布曲线如图1所示,

其基本力学参数如表1所示。

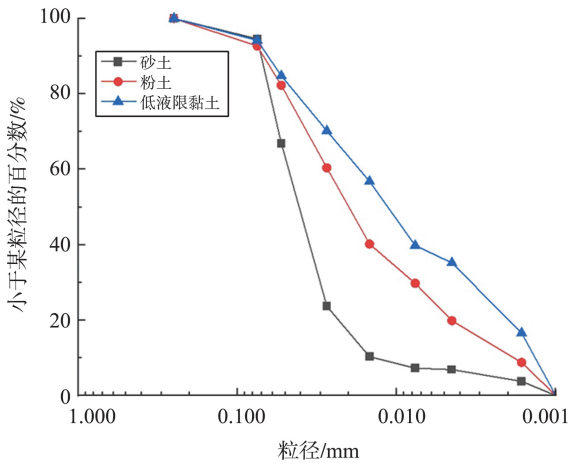


图1 试验用土颗粒粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of testing soil particles

表1 试验用土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of testing soils

材料	液限/%	塑限/%	最佳含水率/%	最大干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
砂土			12.34	1.66
粉土	26.50	14.36	16.30	1.80
低液限黏土	31.84	17.14	18.10	1.87

### 1.3.2 试验结构物

结构物的粗糙程度对土-结构接触面渗流破坏有直接影响。土-结构接触面渗流破坏试验中,若采用混凝土块作为结构物,则必须在接触面上安装大量传感设备测量接触面的变形。传感器的安装势必会影响接触面上土体颗粒运移。因此,本研究土-结构接触面渗流破坏试验,采用对有机玻璃处理的方法模拟混凝土结构物,采用数字照相的方式测量接触面变形。

考虑到有机玻璃表面与混凝土结构面的粗糙程度相差较大,本研究采取用砂纸打磨有机玻璃的方式模拟混凝土结构面。通过土-混凝土、土-有机玻璃的接触面直剪试验确定适用于模拟混凝土结构面的有机玻璃的处理方式。

不同砂纸打磨有机玻璃-土结构面的直剪试验结果如图2所示。本研究选用了3种粗糙程度不同的有机玻璃,分别为未经打磨的光滑有机玻璃、P240 金刚石砂纸打磨的有机玻璃以及 P80 金刚石砂纸打磨的有机玻璃。P240 和 P80 两种砂纸的金刚石粒径分别为 61、180  $\mu\text{m}$ 。从图2可以看出,采用 P240 金刚石砂纸打磨的有机玻璃-土结构面在各法向压力作用下的抗剪强度与混凝土-土结构面的抗剪强度相差极小,说明可以采用 P240 金刚石砂纸打磨的有机玻璃模拟真实的混凝土结构面。

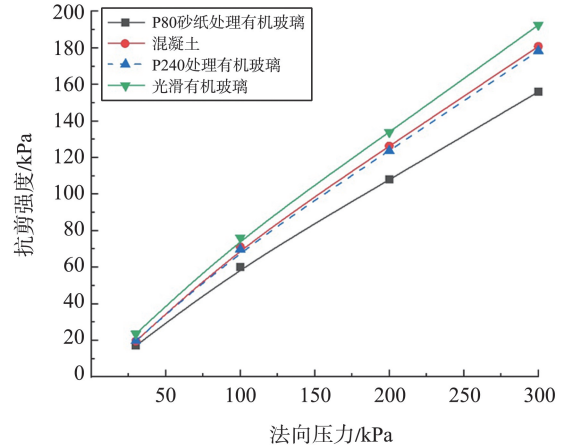


图2 土-结构面直剪试验结果

Fig.2 Soil-structural plane direct shear test results

## 1.4 土-结构接触面渗流破坏试验步骤及试验工况

### 1.4.1 土-结构接触面渗流变形试验步骤

本研究土-结构接触面渗流破坏试验主要包括以下7步:

(1)将土样放在塑料板上自然风干,风干后的土样采用粉碎机粉碎,粉碎后的土样过 2 mm 筛。

(2)取过筛后的土样,根据土样/染色剂质量比 100:1 和最佳含水率称取染色剂和水,将土样、水和染色剂拌合均匀。将拌合后的土样装入塑料桶中,润湿 24 h。

(3)土样填筑前,采用燃烧法测量土样的实际含水率。土样的填筑按照原色土与染色土交替的方式填筑,根据填筑高度和土样实际含水率计算每层土样实际用量。

(4)在土样填筑过程中,在渗流破坏室内安装光栅位移传感器。

(5)土样填筑完成后,在仪器顶面安装激光位移传感器。在渗透破坏接触面正面架设相机与打光灯。调整相机角度,确保镜头与渗透破坏接触面垂直,从而使拍摄的照片能够准确反映接触面土体的真实变形。

(6)试样装填后,提升供水装置的水头,使供水装置的水头略高于试样底面位置,再慢慢升高供水装置的水位,每次提升 1 cm,并停留 4 h 后,再提升供水装置水头,直至供水装置水头与试验装置出水口高度相同,保证土体完全饱和。

(7)土样饱和且出水口有水流后,开始进行接触面渗流破坏试验。根据设定好的水力梯度,提升供水装置的水位,监测渗流量和变形。

### 1.4.2 土-结构接触面渗流变形试验工况

水利工程的土-结构接触面主要包括土石堤坝

-穿堤涵闸、防渗墙-基岩等,土石堤坝、防渗墙等构造物土质主要为砂土、粉土及低液限黏土3类。穿堤、穿坝等结构物主要为混凝土结构物,其表面粗糙程度存在一定差异。因此,本研究通过土-结构接触面直剪试验确定了与混凝土表面粗糙程度一致的有机玻璃处理方法(P240砂纸处理的有机玻璃)。选取光滑有机玻璃和P80砂纸处理过的有机玻璃分别模拟粗糙度低于/高于混凝土表面的情况,共设计9种试验工况,如表2所示。

表2 土-结构接触渗流变形试验工况  
Table 2 Test conditions for soil-structure contact seepage deformation

编号	接触面	土质
I-1	光滑有机玻璃	砂土
I-2	光滑有机玻璃	粉土
I-3	光滑有机玻璃	低液限黏土
I-4	P240砂纸处理有机玻璃	砂土
I-5	P240砂纸处理有机玻璃	粉土
I-6	P240砂纸处理有机玻璃	低液限黏土
I-7	P80砂纸处理有机玻璃	砂土
I-8	P80砂纸处理有机玻璃	粉土
I-9	P80砂纸处理有机玻璃	低液限黏土

## 2 土-结构接触面渗流变形机制

### 2.1 土-结构接触面变形空间分布规律

土体分层染色填筑的示意图如图3所示。

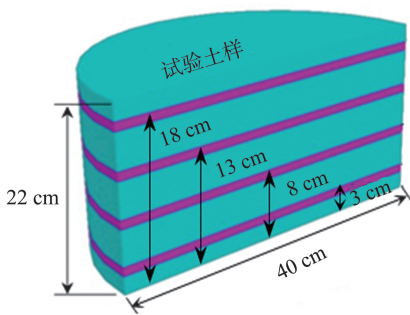


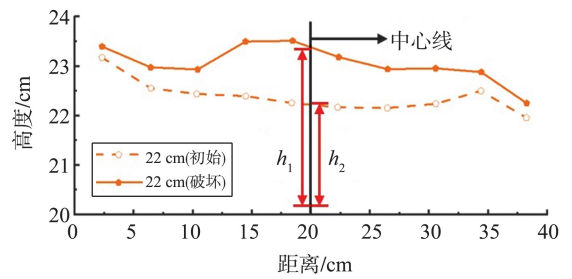
图3 分层填筑示意图

Fig.3 Schematic diagram of layered filling

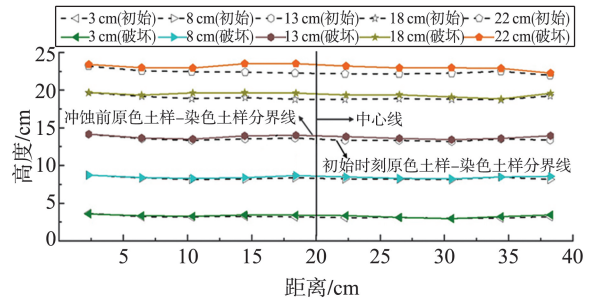
工况 I-6 土-结构接触面变形及应变分布规律如图4所示。图4中实线为土颗粒冲蚀前接触面原色土样与染色土样分界线,虚线为试验初始时刻接触面原色土样与染色土样分界线。

从图4可以看出,接触面变形和应变在水平方向上呈“凸”字型分布,中间部分变形大,两侧变形小。这主要是因为沿圆形侧壁的土体变形通过圆环固定,该圆环对土体的固定约束作用在接触面的中间部位约束最小。因此,在相同水力坡降条件下

接触面中间部分变形最大。



(a) 接触面顶部变形



(b) 接触面变形分布

图4 工况 I-6 接触面变形分布

Fig.4 Deformation distribution of interface of I-6

土-结构接触面顶部应变如图5~7所示。

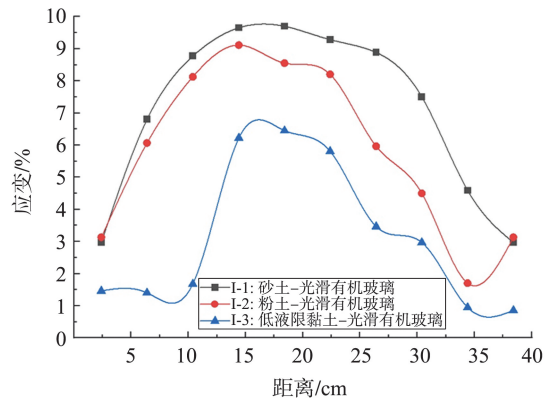


图5 光滑有机玻璃接触面顶部应变空间分布

Fig.5 Spatial distribution of strain on the top of the smooth plexiglass contact surface

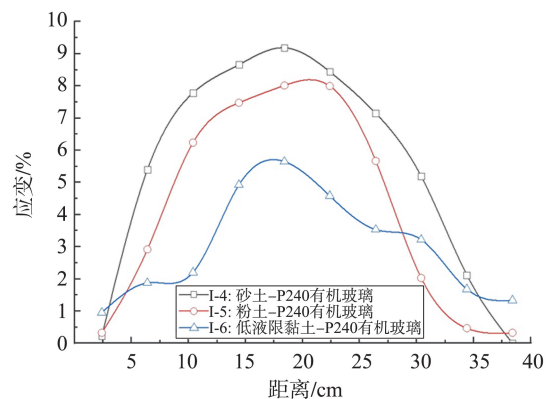


图6 P240有机玻璃接触面顶部应变空间分布

Fig.6 Spatial distribution of strain on the top of the contact surface of P240 plexiglass

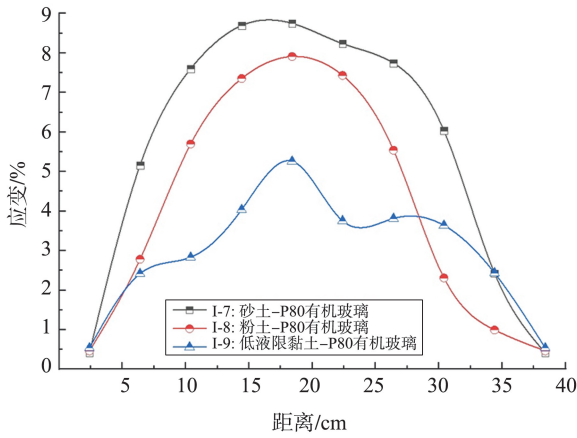


图7 P80有机玻璃接触面顶部应变空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of strain on the top of the P80 plexiglass contact surface

从图5~7可以看出,接触面中心线上的应变约为5.0%~10.0%,中心线两侧6 cm范围内应变变化较小。当距离中心线超过6 cm时接触面顶部应变很快下降,砂土-接触面渗流变形的试验工况顶部应变下降到3.0%以下。这说明本试验中渗流对土-结构接触面的影响是有一定范围的,试验条件下该范围约为沿接触面中心线对称分布的6 cm左右。接触面顶部应变的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_2}{h_2}, \quad (1)$$

式中: $h_1$ 为接触面中心线原高度,cm; $h_2$ 为接触面中心线渗流破坏前高度,cm; $\varepsilon$ 为接触面中心线的应变。

### 2.2 土体变形空间分布规律

土体内部采用光栅位移传感器设置两个变形监测点,位移传感器距接触面的距离分别为6、12 cm。土体表面采用激光测距仪设置两个变形监测点,分别位于内部变形监测点的正上方。土-结构接触面渗流破坏土体变形监测点布置如图8所示。

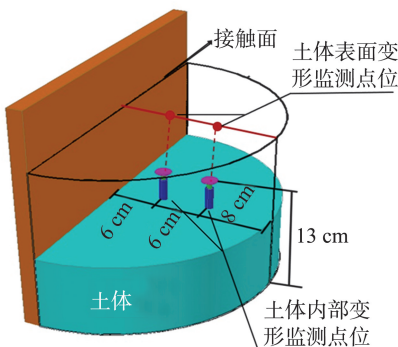


图8 土体变形监测点布置图  
Fig.8 Layout of soil deformation monitoring points

本研究各试验工况土体表面变形和内部变形的空间分布情况如图9~11所示。

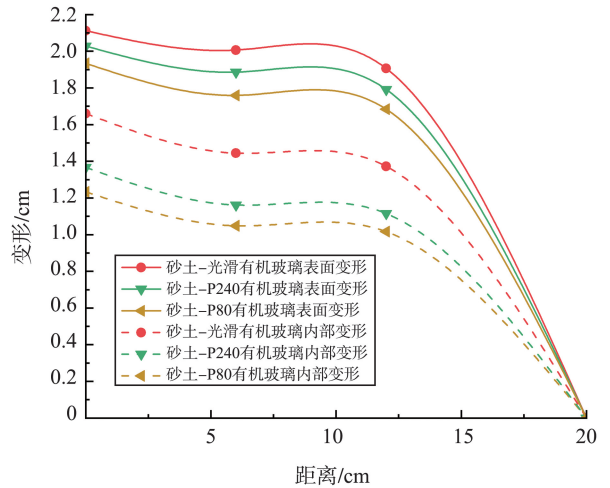


图9 砂土土体变形空间分布  
Fig.9 Spatial distribution of soil deformation of sandy soil

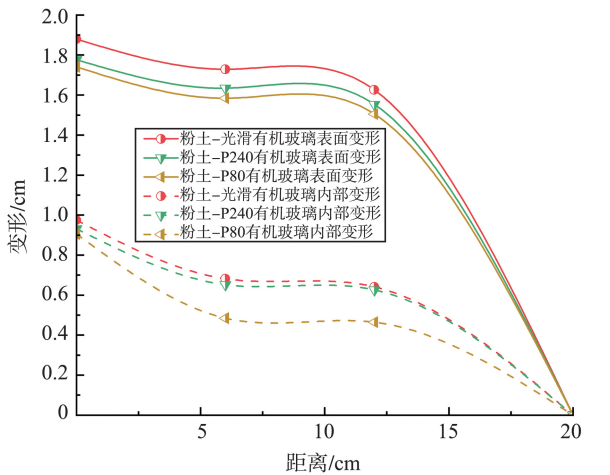


图10 粉土土体变形空间分布  
Fig.10 Spatial distribution of soil deformation of silt soil

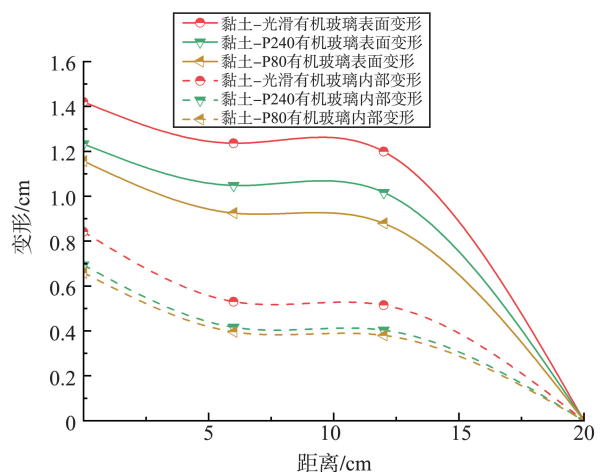


图11 低液限黏土土体变形空间分布  
Fig.11 Spatial distribution of soil deformation of low liquid limit clay

图9~11中横坐标为接触面法向方向的距离,纵坐标为土体表面或内部变形,实线为土体表面变形,虚线为土体内部变形。土体内部、表面变形的空间分布规律类似,即随着径向距离增加土体内部

变形减小,当距接触面距离达到 6 cm 时,土体内部变形减少了 13%~43%。随着接触面距离的增加,土体内部变形变化较小。结合土体表面变形规律可以得出,本试验中土-结构接触面渗流变形的影响范围为半径 6 cm 的半圆柱。

### 2.3 土-结构接触面渗流作用范围

土体渗透系数的变化主要是由于土体颗粒在外力作用下发生移动,导致土体颗粒的孔隙改变,进一步导致渗透系数改变。本研究根据 2.1、2.2 节分析可知,接触面轴线上半径为 6 cm 的半圆柱体为接触渗流的实际影响范围,如图 12 所示。

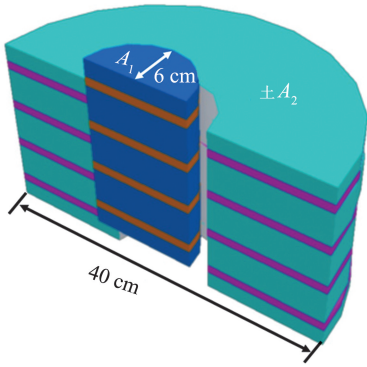
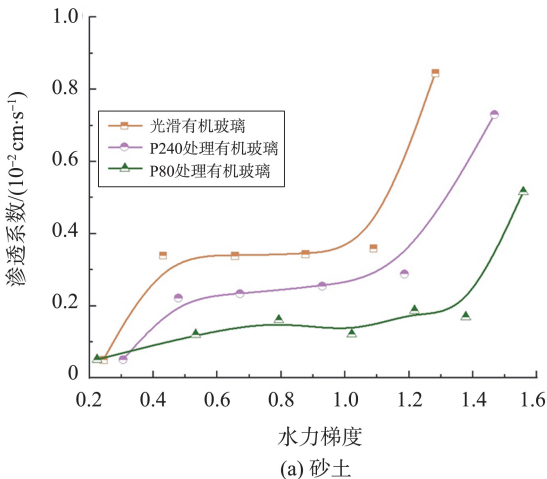


图 12 试验影响区域  
Fig.12 Test impact area

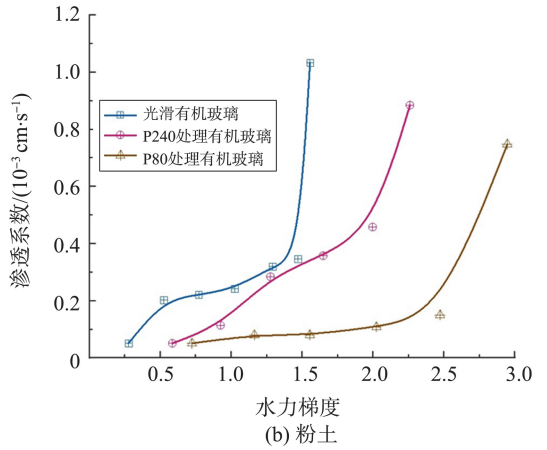
土-结构接触面渗流破坏过程中土体的渗透系数为接触面影响范围内土体渗透系数与影响范围外土体渗透系数的组合,计算公式为

$$K = \frac{K_1 A_1 + K_2 A_2}{A} \quad (2)$$

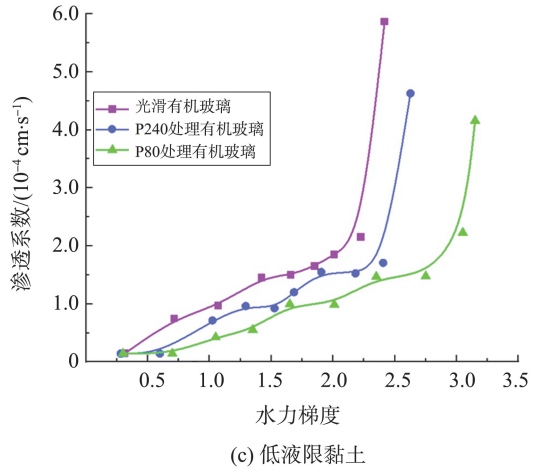
式中, $K$  为根据室内试验获取的复合渗透系数, $K_1$  为接触面渗透系数, $K_2$  为内部土体渗透系数, $A_1$  为接触面渗流变形影响范围内土体面积, $A$  为试验中半圆形面积, $A_2$  为接触面渗流变形影响范围以外半圆环面积。根据公式(2)计算得到的接触面影响范围内土体渗透系数变化规律如图 13 所示。



(a) 砂土



(b) 粉土



(c) 低液限黏土

图 13 接触部位渗透系数变化规律  
Fig.13 Variation law of permeability coefficient of contact area

从图 13 可以看出,接触面渗透系数呈现较明显的三阶段特性。第一阶段接触面的渗透系数随水力坡降的增加呈线性增长的趋势;第二阶段随着接触面变形的加剧,接触面的渗透系数呈现较明显的非线性变化;第三阶段由于接触面变形的突然加剧,接触面的渗透系数也突然增大。

## 3 土-结构接触面渗流破坏变形条件分析

### 3.1 土-结构接触面渗流流速-水力梯度演化规律

土-结构接触面渗流破坏过程中渗流流速的变化规律如图 14 所示。

从图 14 可以看出,随着接触面水力坡降的增加,流速呈较明显的“三段式”分布特征。第一阶段,随水力坡降增加,流速呈线性增长的趋势,这一阶段较符合达西定律;第二阶段,随着水力坡降的进一步增加,流速呈非线性增长;第三阶段,随着水力坡降的增加,流速突然增加,土-结构接触面发生渗流破坏。

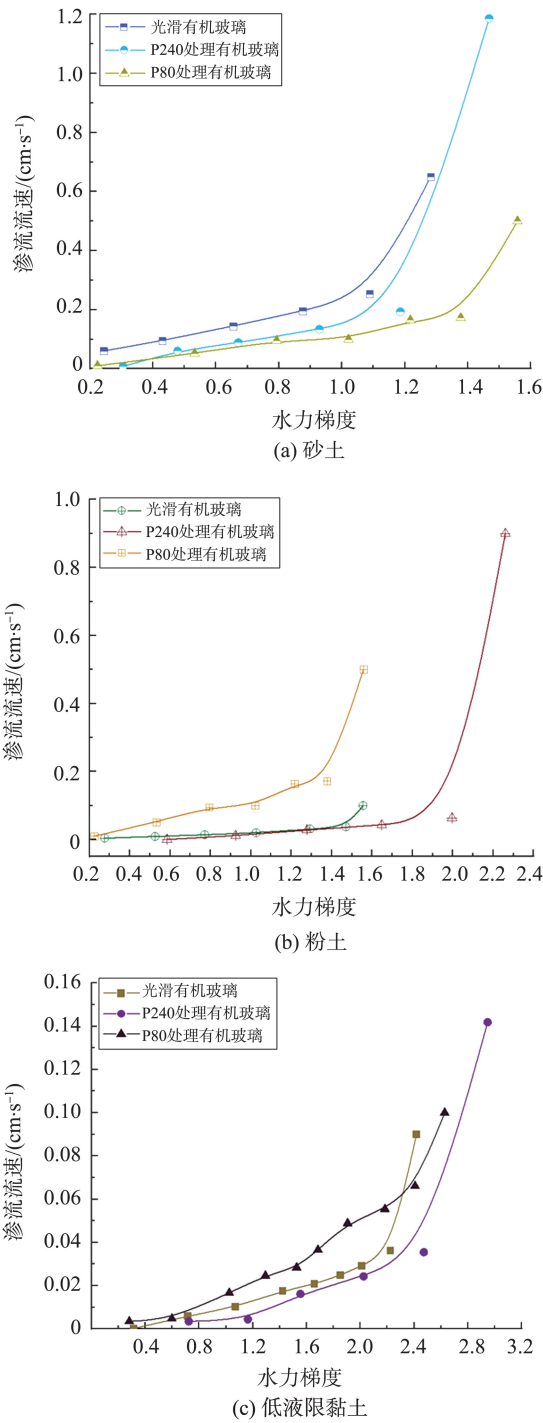


图 14 渗流流速变化规律

Fig.14 Variation law of seepage velocity

### 3.2 土-结构接触面应变-水力梯度演化规律

土-结构接触面应变随水力梯度增加的演化规律如图 15 所示。

从图 15 可以看出,接触面应变随水力坡降的增加而增大,且分为较明显的双曲线变化规律,类似于土-结构接触面剪切破坏时接触面变形规律。渗流作用下接触面的变形与土质和接触面存在极强的关联关系。砂土-结构接触面渗流破坏时的应变为 9.0% 左右,粉土-结构接触面渗流破坏

时的应变为 7.9%~9.1%,低液限黏土-结构接触面渗流破坏时的应变为 5.2%~6.5%。接触面的粗糙程度对于砂土-结构接触面渗流变形条件影响较小,对低液限黏土和粉土的影响较大。

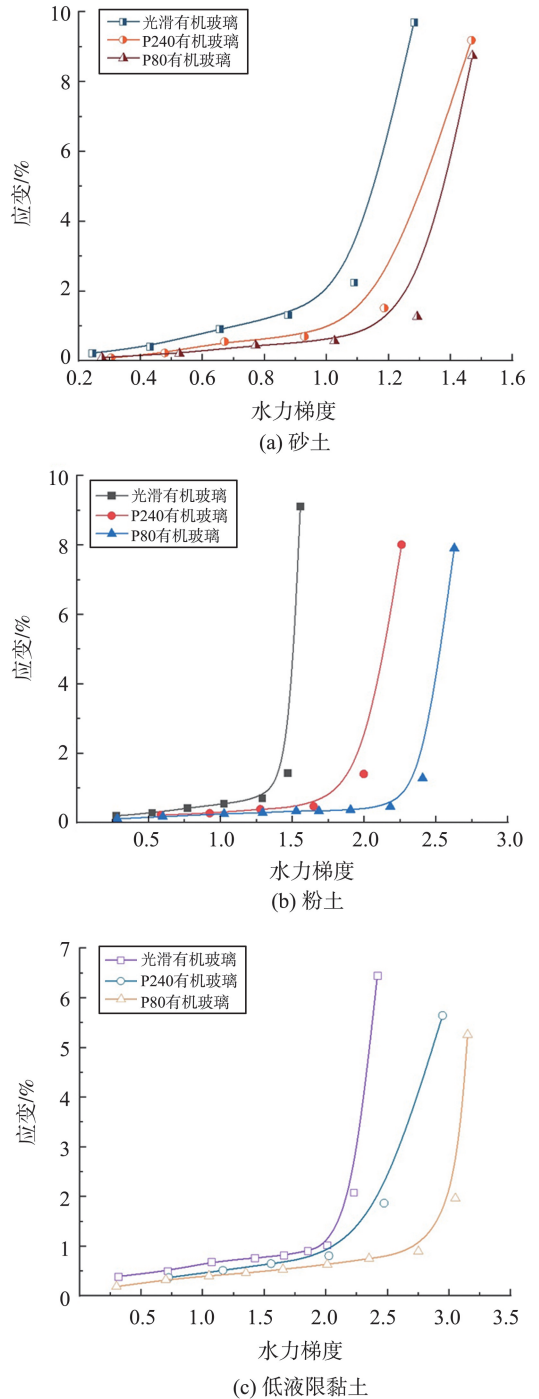


图 15 土-结构接触面应变变化规律

Fig.15 Strain variation law of soil-structure interface

### 3.3 土-结构接触面渗流破坏过程

本节以砂土-P240 有机玻璃接触面渗流破坏过程为例,分析土-结构接触面的渗流破坏过程。砂土-P240 有机玻璃接触面渗流破坏水力坡降与渗流流速和接触面变形的关系如图 16 所示。

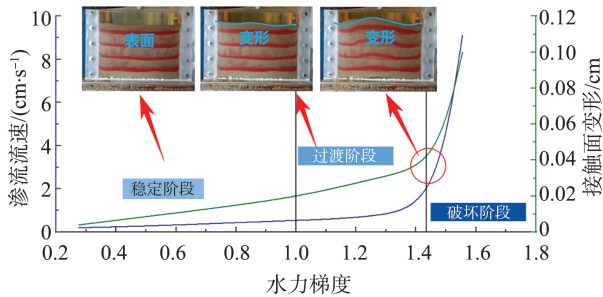


图16 土-结构接触渗流变形过程

Fig.16 Soil-structure contact seepage deformation process

从图16可以看出,土-结构接触面渗流破坏分为3个阶段,分别为渗流稳定阶段、渗流过渡阶段和渗流破坏阶段。

(1) 渗流稳定阶段:接触面变形、渗透流速随渗透坡降的增加呈线性增长。

(2) 渗流过渡阶段:随着水力坡降的增加,接触面变形和渗流流速呈非线性增长的趋势,接触面处的土体出现微微隆起的现象,但在此阶段接触面处无土颗粒流出,渗出水清澈无杂质。

(3) 渗流破坏阶段:接触面土体隆起加剧,接触面处有大量细颗粒溢出,渗流量激增,入渗水头持续下降,最终土体底面水位与试验装置出水口高度一致,接触面处形成贯通的渗漏通道。

渗流过渡阶段一般都较短,在本试验中多是最后2~3级水头。在试验过程中,即使将渗流过渡阶段的最后一级水头维持数小时,接触面仍未发生破坏。但是,水力坡降在此基础上稍有增加,土-结构接触面即发生渗流破坏。因此,在施加渗流过渡阶段的最后一级(渗流破坏阶段的起始水头)水头时,土-结构接触面已经达到临界状态。因此,本研究将渗流破坏阶段的起始水力坡降命名为“渗流临界水力坡降”,将渗流破坏的终止水力坡降命名为“渗流破坏水力坡降”。

## 4 结论

本文研制了土-结构接触面渗流破坏试验装置,开展了土-结构接触面渗流破坏试验,根据影响接触面渗流破坏的因素设计试验工况,研究了土-结构接触面渗流破坏过程中渗流参数和变形参数的变化规律,得到的主要结论如下。

(1) 试验中接触面水平方向的变形呈对称分布,垂直于接触面方向上土体内变形随距离增加呈非线性减小趋势。

(2) 土-结构接触面渗流破坏过程分为3个阶段。在渗流稳定阶段,接触面变形、接触面渗透系数随水力坡降的增加呈线性增加;在渗流过渡阶段,接触面变形、接触面渗透系数随水力坡降呈非线性增长的趋势;在渗流破坏阶段,接触面变形、接触面渗透系数发生激增。

(3) 渗流作用下接触面的变形与土质和接触面存在极强的关联关系。砂土-结构接触面渗流破坏时的应变为9.0%左右,粉土-结构接触面渗流破坏时的应变为7.9%~9.1%,低液限黏土-结构接触面渗流破坏时的应变为5.2%~6.5%。

## 参考文献:

- [1] HU Z, YANG Z X, WILKINSON S P. Analysis of passive earth pressure modification due to seepage flow effects [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55 (5): 666-679.
- [2] RICHARDS D J, WIGGAN C A, POWRIE W. Seepage and pore pressures around contiguous pile retaining walls [J]. Geotechnique, 2016, 66(7): 523-532.
- [3] XIE Q Y, LIU J, HAN B, et al. Experimental investigation of interfacial erosion on culvert-soil interface in earth dams [J]. Soils and Foundations, 2019, 59(3): 671-686.
- [4] ZHANG G, ZHANG J M. Numerical modeling of soil-structure interface of a concrete-faced rockfill dam [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 762-772.
- [5] BALLOFFET A, SCHEFFLER M L. Numerical analysis of the Teton Dam failure flood [J]. Journal of Hydraulic Research, 1982, 20(4): 317-328.
- [6] SCOTT R F. Baldwin Hills reservoir failure in review [J]. Engineering Geology, 1987, 24(1/2/3/4): 103-125.
- [7] 李君纯. 青海沟后水库溃坝原因分析 [J]. 岩土工程学报, 1994(6): 1-14.  
LI Junchun. Gouhou dam and analysis for causes of the dam failure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994(6): 1-14.
- [8] 刘杰. 八一水库溃坝原因分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(3): 161-166.  
LIU Jie. Analysis of dam break of Bayi reservoir [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(3): 161-166.
- [9] 中国水利年鉴编委会. 中国水利年鉴 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023: 17.
- [10] WUDTKE R B, WITT K J. A static analysis of hydraulic heave in cohesive soil [C]// International

- Conference on Scour and Erosion, Amsterdam, Netherlands; CURNET, 2015: 721-726.
- [11] FONTANA N. Experimental analysis of heaving phenomena in sandy soils [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(6): 794-799.
- [12] YOUSEFI M, SEDGHI-ASL M, PARVIZI M. Seepage and boiling around a sheet pile under different experimental configuration [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(12): 1-9.
- [13] HONG Y, NG C W W. Basestability of multi-propped excavations in soft clay subjected to hydraulic uplift [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(2): 153-164.
- [14] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 36(增刊1): 73-78.  
LUO Yulong, WU Qiang, ZHAN Meili, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 36(Suppl.1): 73-78.
- [15] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 悬挂式防渗墙控制管涌发展的试验研究 [J]. *水利学报*, 2005, 36(1): 42-50.  
MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Experimental study on piping development control by means of suspended cut-off wall [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(1): 42-50.
- [16] 周晓杰, 丁留谦, 姚秋玲, 等. 悬挂式防渗墙控制堤基渗透变形发展模型试验 [J]. *水力发电学报*, 2007, 26(2): 54-59.  
ZHOU Xiaojie, DING Liuqian, YAO Qiuling, et al. Laboratory model test for evolution of seepage deformation controlled by means of suspended cut-off wall in foundation of dike [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(2): 54-59.
- [17] 王保田, 陈西安. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增刊1): 2766-2771.  
WANG Baotian, CHEN Xi'an. Research on effect of suspended cut-off wall with simulation test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Suppl.1): 2766-2771.
- [18] 邵生俊, 杨春鸣. 粗粒土泥浆护壁防渗墙的抗渗设计方法研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(增刊1): 46-53.  
SHAO Shengjun, YANG Chunming. Research on the impermeability design method of the slurry protection diaphragm wall in the coarse grained soil foundation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(Suppl.1): 46-53.
- [19] 李想, 盛金昌, 詹美礼, 等. 超固结对防渗墙与高塑性粘土接触结构渗透性的影响 [J]. *水电能源科学*, 2012, 30(9): 70-72.  
LI Xiang, SHENG Jinchang, ZHAN Meili, et al. Influence of over-consolidation on permeability of contact zone between concrete cutoff wall and high plasticity clay [J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(9): 70-72.
- [20] KIM H J, PARK J M, SHIN J H. Flow behavior and piping potential at the soil-structure interface [J]. *Geotechnique*, 2018, 69(1): 1-6.
- [21] LOCKE M, INDRARATNA B, ADIKARI G. Time-dependent particle transport through granular filters [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 127(6): 521-529.
- [22] REBOUL N, VINCENS E, CAMBOU B. A computational procedure to assess the distribution of constriction sizes for an assembly of spheres [J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(1/2): 195-206.
- [23] BEGUIN R, PHILIPPE P, FAURE Y H. Pore-scale flow measurements at the interface between a sandy layer and a model porous medium: application to statistical modeling of contact erosion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 2013, 139(1): 1-11.
- [24] CYRIL G, YVES-HENRI F, RÉMI B, et al. Contact erosion at the interface between granular coarse soil and various base soils under tangential flow condition [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(5): 741-750.
- [25] 朱亚军, 彭君, 陈群. 砂砾石与黏土的接触冲刷试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊2): 92-97.  
ZHU Yajun, PENG Jun, CHEN Qun. Contact scouring tests on sandy gravel and cohesive soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Suppl.2): 92-97.
- [26] 陈群, 彭君, 朱分清. 砂砾石与砂接触冲刷试验研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊1): 295-300.  
CHEN Qun, PENG Jun, ZHU Fenqing. Experimental study of contact scouring between sandy gravel and sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Suppl.1): 295-300.
- [27] RÖNNQVIST H, VIKLANDER P. A unified-plot approach for the assessment of internal erosion in embankment dams [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 10(1): 66-80.