

DOI: 10.11779/CJGE20230839

# 高面板坝挤压墙-垫层料接触面的大型单剪试验及力学特性研究

孙大伟<sup>1,2</sup>, 许鑫洋<sup>1,2</sup>, 郎能惠<sup>3,4</sup>, 章涵<sup>\*1,2</sup>, 李登华<sup>3</sup>, 许兵<sup>1</sup>, 黄城友<sup>1,2</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;  
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 21 世纪以来高面板堆石坝多采用挤压墙施工技术, 研究挤压墙-垫层料接触面力学特性以真实预测面板应力变形对于确保大坝安全相当重要。目前锯齿状挤压墙-垫层料接触面的单剪试验和离散元仿真成果均未见到。为此以某 200 m 级高坝为参照, 开展挤压墙-垫层料接触面大型单剪试验, 比较锯齿状和平面状两种不同型式挤压墙-垫层料接触界面力学特性的差异。首次采用离散元数值单剪试验分析了接触区垫层料的位移特征及其影响因素, 发现与平面状挤压墙相比, 锯齿状挤压墙导致垫层料颗粒发生更剧烈的转动并导致靠近接触面的垫层料变形加大。基于锯齿状挤压墙-垫层料接触面的单剪试验成果确定了接触面本构模型及其参数, 有助于提高面板堆石坝的面板应力变形计算准确性。

**关键词:** 堆石坝; 单剪试验; 挤压墙; 离散元; 接触面

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)02-0388-09

作者简介: 孙大伟(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事堆石坝的本构模型研究及计算方面的科研工作。E-mail: daweisun@126.com。

## Simple shear tests and mechanical properties of interface between extrusion wall and cushion layer of high concrete face rockfill dams

SUN Dawei<sup>1,2</sup>, XU Xinyang<sup>1,2</sup>, LI Nenghui<sup>3,4</sup>, ZHANG Han<sup>1,2</sup>, LI Denghua<sup>3</sup>, XU Bing<sup>1</sup>, HUANG Chengyou<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education,

Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 4. The National Key Laboratory  
of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The extrusion wall technology has been widely used in high concrete face rockfill dams in the 21th century. It is very important for dam safety to study the mechanical properties of the contact surface between the extrusion wall and the cushion layer for actually predicting the stress and deformation behavior of the face slab. At present, the simple shear tests and discrete element simulation investigations related to the contact face between the zigzag extrusion wall and the cushion layer are not available. Therefore, taking a 200 m-level dam as a reference, the large-scale simple shear tests of the contact surface between the extrusion wall and the cushion layer materials are carried out, and the mechanical properties of contact surfaces with zigzag and planar extrusion walls are compared and analyzed. The shear deformation and rotation characteristics and influencing factors of the cushion layer materials are analyzed by using the discrete element numerical simple shear tests for the first time. Compared with the planar extrusion wall, the zigzag extrusion wall causes the larger rotation magnitude of the blocks in the cushion materials and the larger deformation of the cushion materials near the contact surface. Based on the simple shear test results of the zigzag extrusion wall-cushion material contact surface, the contact surface model and the parameters are determined. It is helpful to improve the accuracy of stress and deformation calculation for face slab of high concrete face rockfill dams.

**Key words:** rockfill dam; simple shear test; extrusion wall; discrete element; contact surface

## 0 引言

面板堆石坝是水电工程中最有竞争力的坝型, 中国已有 100 多座面板堆石坝采用挤压边墙技术, 包括

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207218)

收稿日期: 2023-08-30

\*通信作者 (E-mail: zhanghan@cug.edu.cn)

坝高 132 m 的公伯峡坝、坝高 218 m 的龙首坝、坝高 233 m 的水布垭坝、坝高 239 m 的拉哇坝、坝高 247 m 的大石峡坝<sup>[1]</sup>。此类高面板堆石坝的坝体自上游至下游依次为混凝土面板、锯齿状挤压边墙和垫层料, 如图 1 所示。因为面板堆石坝的安全与混凝土面板应力变形状态密切相关, 所以混凝土面板与堆石坝体之间接触面力学特性研究成为当前重要课题之一。

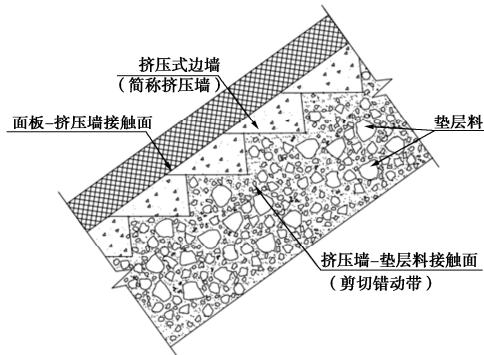


图 1 挤压墙实际结构

Fig. 1 Structure of extrusion wall

周小文等<sup>[2]</sup>、王艳丽等<sup>[3]</sup>用单剪仪研究了垫层料-混凝土面板接触面的特性, 张国栋等<sup>[4]</sup>采用直剪仪和单剪仪比较研究了土石混合体-混凝土接触面的应力变形特性, 李登华等<sup>[5]</sup>用接触面试验仪研究了垫层料-人工粗糙面混凝土接触面的力学特性。张建民<sup>[6]</sup>和张嘎等<sup>[7]</sup>采用接触面循环加载剪切仪研究了粗粒土-钢板接触面力学特性, 建立了接触面 EPDI 模型。张嘎等<sup>[8]</sup>将锯齿状挤压边墙简化为等厚混凝土的等效板和等效接触面, 通过数值模拟验证了挤压墙概化模型的有效性。

近来离散元数值模拟 (DEM) 方法开始用来描述直剪和单剪试验的颗粒接触应力和变形特征<sup>[9-11]</sup>。Liu 等<sup>[9]</sup>采用离散元模拟了单剪过程中粗粒土的破碎机理与颗粒内部接触力演化规律。Xu 等<sup>[10]</sup>开展了砂-砾石混合料大型单剪离散元仿真, 通过分析颗粒接触应力各向异性与分布特征揭示了砾石含量对剪切过程中混合料变形的影响和机理。Zhang 等<sup>[11]</sup>进行了碎石土直剪离散元试验, 揭示了石块咬合与摩擦滑移对试样强度的影响机理。目前, 锯齿状挤压墙-垫层料接触面的力学性状模拟方面尚未见到离散元单剪仿真成果。

本文以国内某 200 m 级高面板堆石坝为依托, 针对锯齿状和平面状两种不同粗糙度的挤压墙, 开展挤压墙-垫层料接触面的室内单剪试验以及离散元仿真并分析了接触面力学特性。

## 1 接触面单剪试验

### 1.1 试验仪器

挤压墙-垫层料接触面试验采用三峡大学 DHJ-50

型大型叠环单剪仪, 如图 2 所示。该仪器的下盒长和宽均为 600 mm, 内直径 504.6 mm, 下盒最大行程 80 mm。下盒之上可放置 9 层叠环, 叠环装料总高度 200 mm, 其中第 1 层至第 8 层叠环每层叠环高 20 mm, 第 9 层叠环高 50 mm, 试验时用螺栓固定在钢框架上不动, 装料高度 40 mm, 该叠环内试样顶部放置厚 10 mm 钢盖板以供施加法向应力。各叠环之间可安装一定数量的滚针并抹润滑油。

下盒与单剪仪钢基座之间设置有滚轴排并抹润滑油以减小滚动摩擦力, 滚动摩擦力在计算剪切力时扣除。本文标定的滚动摩擦系数为 0.041, 原因如下: ①装料时滚轴排区域洒落的垫层料与润滑油混合在一起, 试验时难以清除干净; ②滚轴排运行几年后, 形状已无法达到出厂时的标准圆柱形态; ③滚轴排嵌入两侧钢轨中还会产生额外的摩擦阻力。以上这 3 个因素共同作用, 使得实际试验中的滚动摩擦系数大于理想条件下的滚动摩擦系数。参照钢质车轮-钢轨的滚动摩擦系数为 0.05, 可见本文测定的滚动摩擦系数处于合理范围内。



图 2 单剪仪照片

Fig. 2 Photo of simple shear apparatus

### 1.2 试验垫层料指标

试验垫层料为灰岩料, 干密度 2.24 g/cm<sup>3</sup>, 连续级配, 最大粒径 60 mm, 小于 20 mm 粒径的颗粒含量为 64.4%, 小于 2 mm 粒径的颗粒含量为 24.8%, 级配曲线如图 3 所示。试验中垫层料的含水率按 4% 控制, 以符合大坝施工现场 3%~5% 含水率要求。

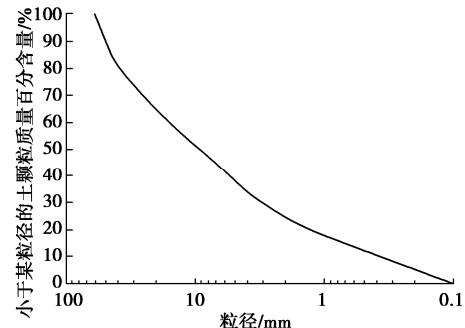


图 3 垫层料级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of cushion layer materials

### 1.3 试验挤压墙制备

试验挤压墙混凝土 28 d 抗压强度 5 MPa, 单剪试

验进行两种型式挤压墙-垫层料之间的接触面力学特性试验研究,一种是图4所示与工程实际相似的缩尺锯齿状挤压墙,另一种是平面状挤压墙。缩尺后的挤压墙锯齿高95 mm,试验挤压边墙板的模型比尺为1:4.2,达到下盒内布置3排挤压墙锯齿的目的。

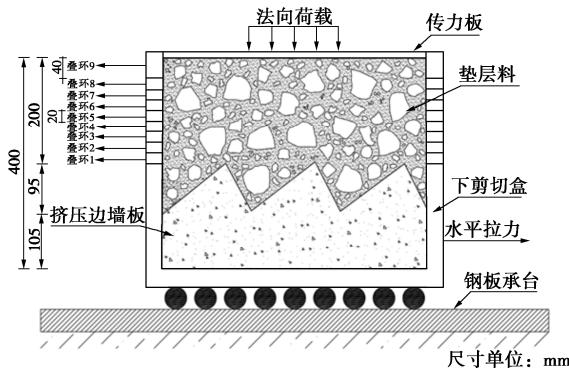


图4 锯齿状挤压墙装料示意图

Fig. 4 Loading of materials of zigzag extrusion wall

#### 1.4 垫层料试样制备

将称好的试样按照4%含水率洒水,拌均匀后分层装入叠环内。每层击实到要求的高度,表面刨毛后再填下一层。最后一层装好后,整平表面。

#### 1.5 试验设定

面板上作用的水压力等于水的重度与水深的乘积,假设坝高为250 m,则面板前水深小于250 m,最大水压力小于2500 kPa。因此试验设定的法向应力分别为200, 500, 1000, 2000, 3000 kPa(可为300 m高坝方案论证做参考)。剪切速率设定为0.5 mm/min,取仪器最大行程80 mm结束试验,即采用下剪切盒与叠环9的相对剪切应变16% (相对剪切位移80 mm/试样直径500 mm)时结束试验。

#### 1.6 接触面单剪试验结果

##### (1) 接触面剪应力-相对水平位移关系

试验得到不同法向应力下挤压墙-垫层料接触面剪应力-相对水平位移关系曲线如图5所示。

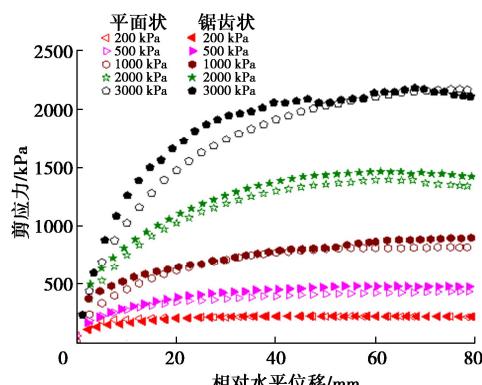


图5 接触面剪应力-相对水平位移关系曲线

Fig. 5 Relationship between shear stress and relative horizontal displacement of contact surface

在法向应力小于1000 kPa时接触面剪应力随相对水平位移增加而增大,达到峰值后基本保持不变,表现为应变硬化型,在法向应力2000, 3000 kPa时,接触面剪应力随相对水平位移增加的达到峰值稍有减小。缩尺锯齿状挤压墙-垫层料接触面的剪应力-相对水平位移关系曲线高于平面状挤压墙-垫层料接触面的剪应力-相对水平位移关系曲线。

##### (2) 垫层料剪切位移

测定叠环的位移可以得到垫层的剪切位移性状,无论是平面状挤压墙还是锯齿状挤压墙,挤压墙-垫层料接触面的垫层料都产生不同程度的剪切位移,单剪试验各叠环剪切位移测定结果表明:法向应力越大,垫层料的剪切位移越大;距挤压墙越近,垫层料的剪切位移越大,在较高法向应力作用下距挤压边墙较远的垫层料也被带动发生剪切变形。锯齿状挤压墙-垫层料之间的接触区的剪切位移要大于平面状挤压墙-垫层料之间的接触区的剪切位移。

挤压墙-垫层料之间存在剪切错动带,是有一定厚度的接触区,由于各高度垫层料均发生了较大的相对水平位移(叠环9固定除外),因此本文试验得到接触区的厚度是整个垫层区厚度200 mm,这与粒径很小的人工砂直剪试验明显分为剪切破碎带、扰动带、微小变形区3个区的情况不同。后续图11~13的离散元模拟结果进一步证实了200 mm厚度接触区的存在。

##### (3) 挤压墙的破损

单剪试验后,观测发现锯齿状挤压墙齿状尖角局部破损,平面状挤压墙表面布满划痕和凹坑,但是两种型式挤压墙均未发生整体断裂破坏,见图6。



(a) 平面状挤压墙 (b) 锯齿状挤压墙(缩尺)

图6 试验结束后挤压墙照片

Fig. 6 Photos of extrusion wall after tests

## 2 离散元法数值模拟分析

采用离散元法数值仿真软件PFC<sup>2D</sup>对单剪试验进行模拟分析,进而从细观力学角度揭示挤压墙-垫层料接触面的变形机理。

### 2.1 离散元模型建立

依据挤压墙-垫层料接触面大型单剪试验,建立图

7 所示离散元数值仿真模型。大于 10 mm 的大粒径垫层料考虑真实石块形态特征, 1~10 mm 小粒径垫层料采用圆形颗粒表征力学特性并采用抗转动线性接触模型, 此模型已成功应用于岩土材料<sup>[12,16]</sup>。

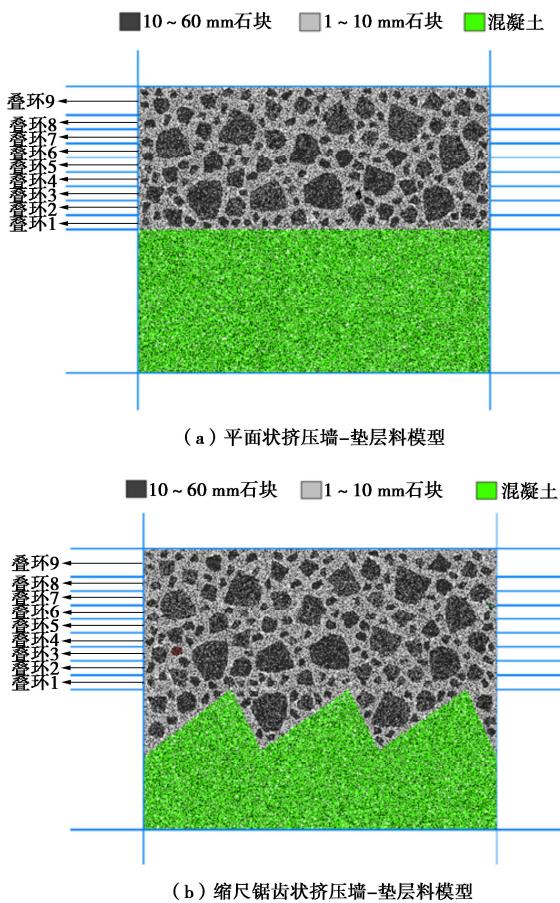


图 7 离散元数值模型

Fig. 7 DEM numerical models

## 2.2 模型细观参数确定

大粒径垫层料颗粒、挤压墙采用平行黏结模型以表征各自的内部胶结强度<sup>[11, 13]</sup>。挤压墙采用 150 mm×150 mm×150 mm 混凝土立方体试件, 大粒径垫层料试件采用直径 50 mm、高 100 mm 的灰岩圆柱形试件, 分别进行室内单轴压缩试验。大粒径垫层料颗粒、挤压墙各自的平行黏结模型细观参数(见表 1)根据图 8, 9 中的室内单轴压缩试验曲线分别反演得到, 假设颗粒间法向黏结强度与切向黏结强度相同。

表 1 挤压墙-垫层料接触面的细观参数

Table 1 Micro-parameters of interface between extrusion wall and cushion layer materials

部位	接触模型类型	弹性模量/GPa	摩擦系数	抗转动系数	法向黏结强度/MPa	切向黏结强度/MPa
挤压墙	平行黏结	4.0	0.9	—	3.2	3.2
大粒径垫层料颗粒	平行黏结	5.0	1.0	—	47.0	47.0
大粒径垫层料之间	线性抗转动	0.1	0.6	0.5	—	—
小粒径垫层料之间	线性抗转动	5.0	1.0	0.5	—	—
大粒径垫层料-小粒径垫层料之间	线性抗转动	5.0	0.8	0.5	—	—
垫层料-挤压墙之间	线性抗转动	0.1	0.5	0.4	—	—

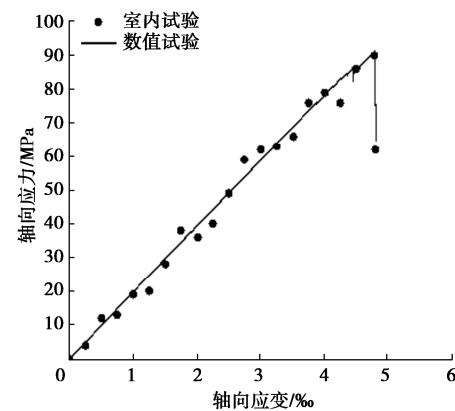


图 8 圆柱垫层料的单轴压缩试验与数值试验应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of unconfined compression laboratory tests and numerical tests of cylinder cushion layer materials

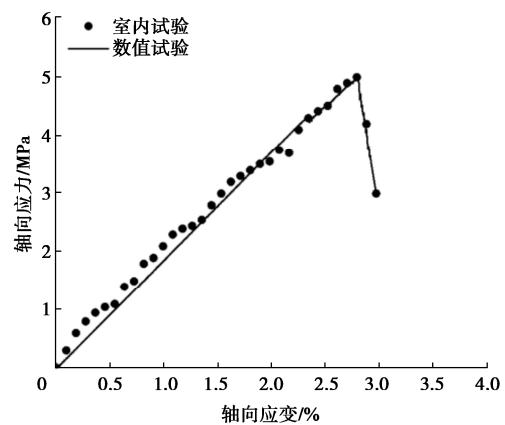


图 9 挤压墙立方体试件的单轴压缩试验与数值试验曲线

Fig. 9 Curves of unconfined compression laboratory tests and numerical tests of cube extrusion wall specimens

大粒径垫层料之间、小粒径垫层料之间、大粒径垫层料-小粒径垫层料之间、垫层料-挤压墙之间接触面采用线性抗转动模型表征不同材料的力学性能, 细观参数值由图 5 中接触面的单剪试验数据反演得出, 见表 1。

## 2.3 离散元计算设定

离散元数值模拟分析的计算条件, 包括法向应力、剪切速率和最大剪切应变均与单剪试验相同。

数值试验中每个叠环均由左右两个对称的 wall 组成, 每个叠环的两个 wall 在运行过程中速度保持一致。

由于叠环的运动是由下剪切盒运动造成的试样摩擦力导致的, 在数值试验中, 通过实时监测每个叠环上的水平接触力  $F$ , 根据牛顿第二定律与每层叠环的质量与叠环内试样质量之和  $M$ , 计算得到该时步下的叠环速度  $v_t = v_0 + (F/M)dt$ , 其中,  $v_0$  为叠环在上一时步的速度,  $dt$  为每个时步对应的时间间隔。

单剪数值试验逐一计算并且记录试验过程中的剪切应力与位移、垫层料颗粒的运动特征变化过程, 进而揭示室内试验无法观测和监测到的叠环内垫层料力学特性和影响机制。

## 2.4 离散元法数值模拟分析结果

### (1) 接触面剪应力-剪切应变关系

单剪试验和离散元数值模拟分析得到的接触面剪应力-剪切应变关系曲线如图 10 所示。

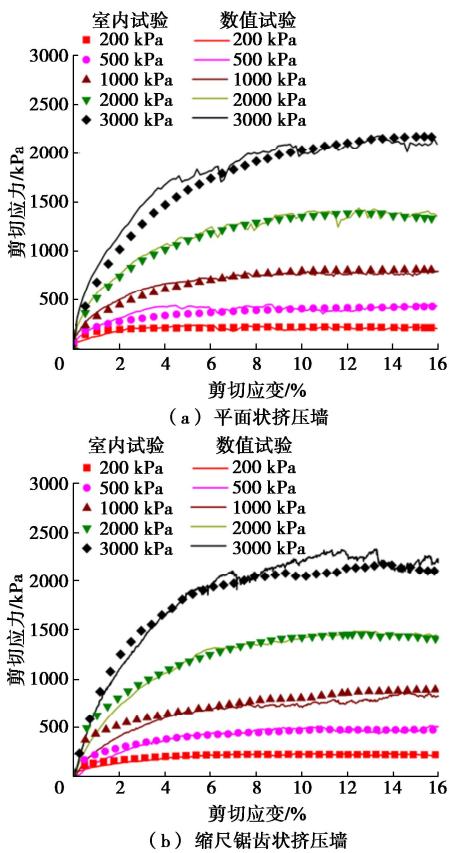


图 10 挤压墙-垫层料试验曲线

Fig. 10 Curves of extrusion wall and cushion layer materials

### (2) 垫层料颗粒位移特征

垫层料颗粒数目极多, 为清晰反映垫层料位移演化特征, 抽取垫层料颗粒数的 1/50 (平面状挤压墙试验取 367 个颗粒, 锯齿状挤压墙试验取 445 个颗粒) 来得到不同剪切应变下位移矢量图。

法向应力 200 kPa 下不同剪切应变下垫层料颗粒位移矢量如图 11 所示, 图中箭头表示垫层料颗粒的位移矢量, 箭头方向代表位移方向, 箭头大小代表位移量。可以看出: 接触面 (区) 内垫层料都产生不同程

度的剪切位移, 距离挤压墙越远垫层料剪切位移越小, 而且剪切位移方向也开始变化, 说明垫层料颗粒在位移时产生错动或转动。随着挤压墙与垫层之间剪切位移的增大, 垫层料颗粒的位移值也增大。

比较图 11, 12 中不同法向应力下平面状挤压墙和锯齿状挤压墙与垫层之间面 (区) 垫层料颗粒水平位移特征, 可以看出, 法向应力越大, 垫层料颗粒水平位移值越大, 锯齿状挤压墙在垫层接触面 (区) 的垫层料水平位移值比平面状挤压墙水平位移要大。

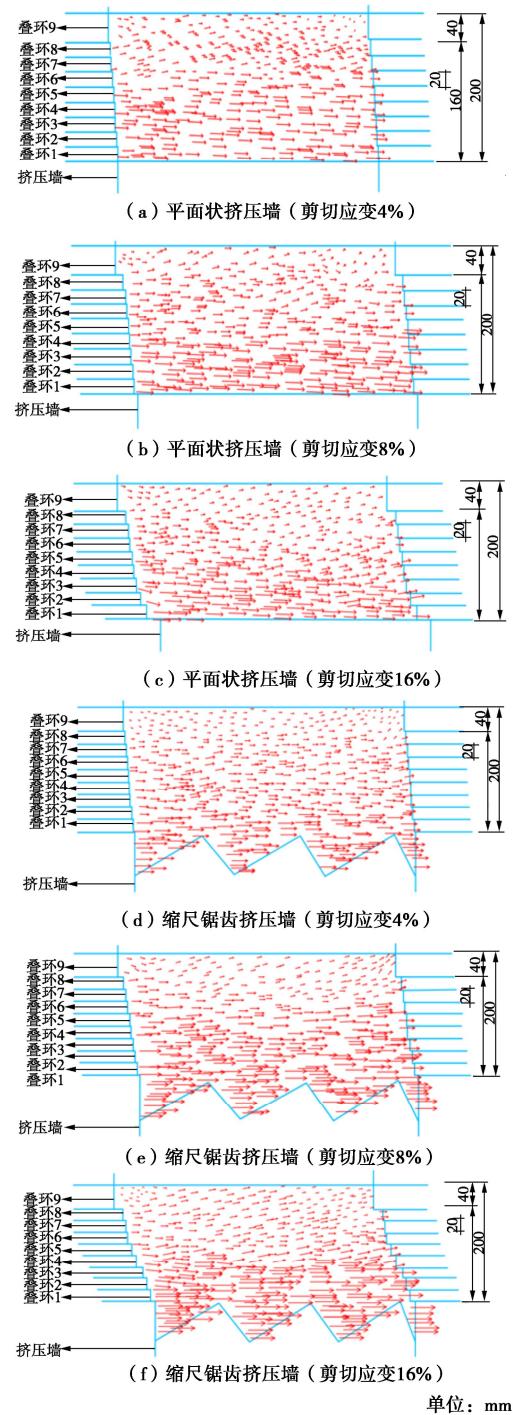


图 11 200 kPa 法向应力下垫层料位移矢量图

Fig. 11 Displacement vectors of cushion layer materials under vertical stress of 200 kPa

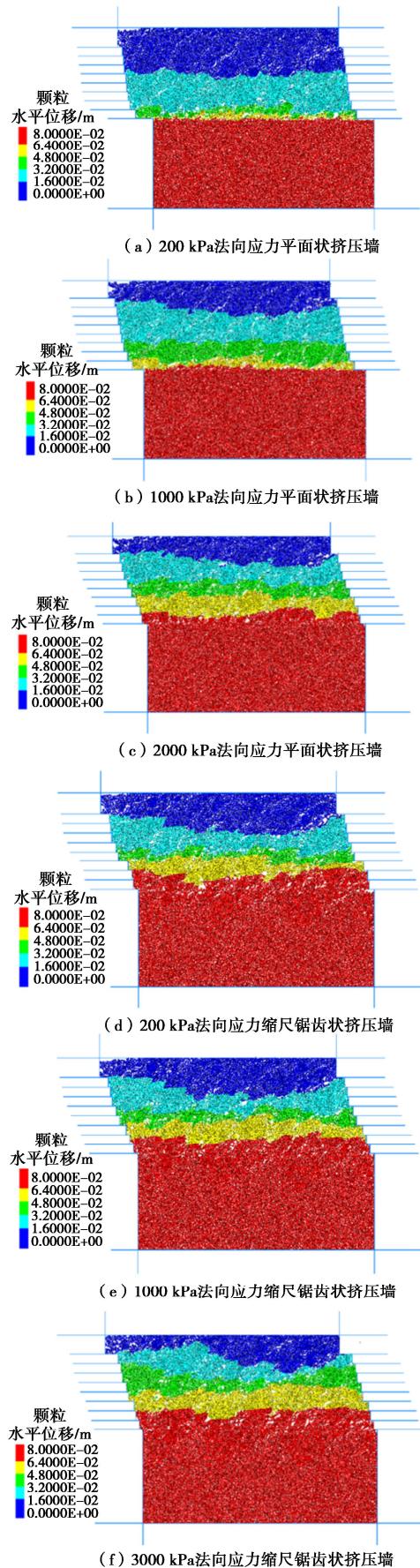
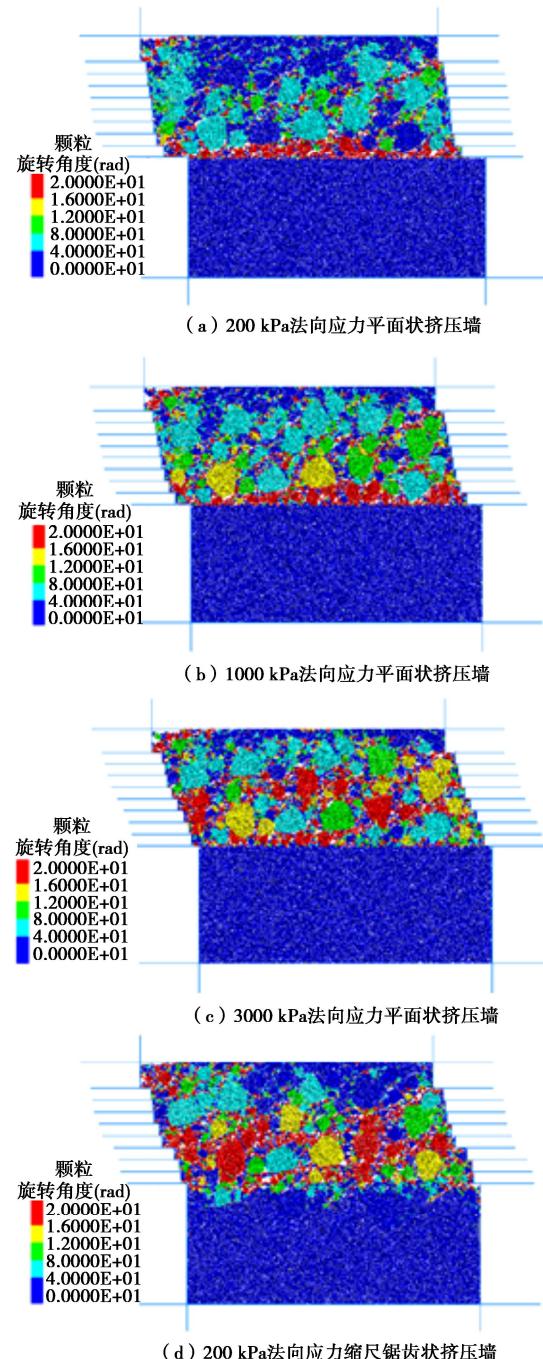


图 12 垫层料颗粒水平位移特征

Fig. 12 Horizontal displacement characteristics of particles of cushion layer materials

### (3) 垫层料颗粒的转动

200, 1000, 3000 kPa 法向应力下平面状挤压墙和锯齿状挤压墙-垫层料接触面(区)垫层料颗粒转动特征如图 13 所示。可以看出: 垫层料粗颗粒在位移同时发生转动, 距离挤压墙越近的颗粒转动角度越大, 随着法向应力增加, 转动角度增大, 锯齿状挤压墙-垫层料接触面(区)垫层料颗粒的转动角度和范围比平面状挤压墙-垫层料接触面(区)的颗粒的转动角度和范围要大。这是由于锯齿状挤压墙水平运动时带动锯齿槽内垫层料共同运动。在此过程中, 锯齿槽内垫层料通过与上方石块间的相互咬合, 提供了更大的摩擦力, 带动叠环内垫层料发生比平面状挤压墙上方垫层料更大的位移。



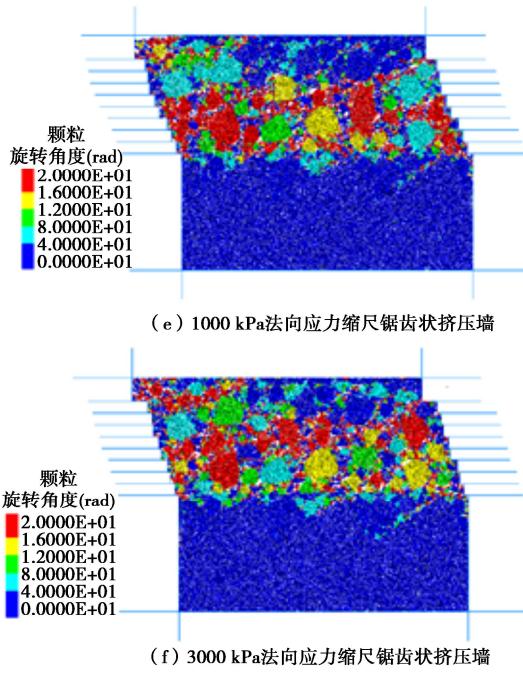


图 13 垫层料颗粒转动特征

Fig. 13 Rotation characteristics of particles of cushion layer materials

本文室内试验的垫层料位移矢量图结果及数值模拟结果与李登华等<sup>[5]</sup>采用接触面试验仪用粒子图像测定技术测得的接触区颗粒运动性状相互印证,也与杨忠平等<sup>[14]</sup>试验得到的土石混合体-锯齿状基岩界面的剪切力学性状近似。

#### (4) 足尺数值单剪试验验证

由于单剪仪尺寸限制,本文室内单剪试验是变比尺的物理模型试验。为验证其合理性,根据工程中垫层料厚度2 m以及实际挤压墙尺寸,建立了如图14所示足尺离散元数值试验模型,包含3排足尺挤压墙锯齿。

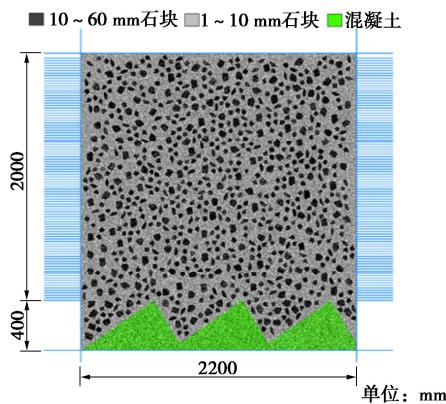


图 14 足尺挤压墙离散元法数值模型

Fig. 14 DEM numerical models of full-scale extrusion wall

本文室内缩尺试验中,垫层料粒径与工程实际采用的级配相同不需要缩尺,只需要对挤压墙锯齿缩尺。因此足尺数值试验中垫层料的级配、颗粒粒径、细观力学参数与缩尺数值试验中相同(见图3和表1)。

足尺数模试验中施加的法向应力、剪切速率等与缩尺数模方案一致,当相对剪切应变16%时停止试验。

足尺锯齿墙和缩尺锯齿墙数值模拟分析结果如图15所示。当法向应力小于1000 kPa时,缩尺试样与足尺试样剪应力误差范围仅在0.5%~6%。而当法向应力大于1000 kPa时,剪应力误差可达到10%~15%。对于接触面抗剪强度而言,缩尺所造成的误差仅为0.5%~5%,并且得到的缩尺试样抗剪强度较足尺试样小。足尺锯齿状挤压墙的剪应力-剪切应变曲线高于缩尺锯齿状挤压墙,说明发生相同相对水平位移时,足尺锯齿状的需要更大的剪应力。根据缩尺锯齿状挤压墙试验数据预测的接触面相对变形略大于大坝的实际变形(对应足尺仿真试验),因此使工程设计偏于安全。

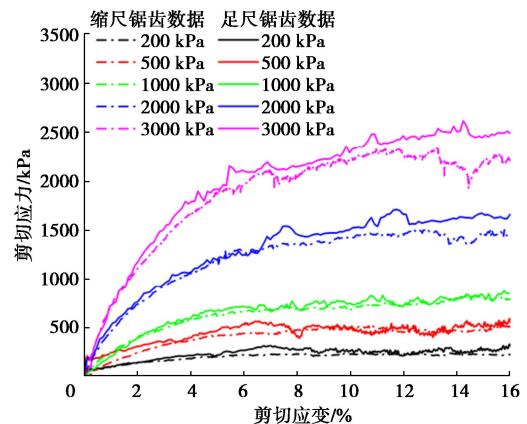


图 15 缩尺及足尺挤压墙数模单剪应力-剪切应变曲线

Fig. 15 Shear stress-shear strain curves of extrusion wall by reduced scale and full-scale DEM models

### 3 挤压墙-垫层料接触面模型

#### 3.1 接触面模型

接触面试验得到的剪应力-剪切应变关系曲线(见图5, 15)可近似认为应变硬化型双曲线,表达式为<sup>[14-15]</sup>

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{kp_a} \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n + \frac{R_f \gamma}{c + \sigma_n \tan \varphi}} \quad . \quad (1)$$

式中:  $\tau$ 为剪应力(kPa);  $\gamma$ 为剪切应变;  $\sigma_n$ 为法向应力(kPa);  $p_a$ 为标准大气压,取101.3 kPa;  $k$ 为无因次的刚度系数<sup>[3]</sup>;  $n$ 为刚度指数;  $c$ 为接触面的黏聚力(kPa);  $\varphi$ 为接触面的内摩擦角(°)。

#### 3.2 模型参数的确定

挤压墙-垫层料接触面抗剪强度与法向应力呈良好的线性关系,可用Mohr-Coulomb准则来描述。整理得到的接触面模型参数如表2所示。

从表2可以看出:缩尺锯齿状挤压墙-垫层料接触

面模型的刚度系数  $k$  和内摩擦角  $\varphi$  比平面状挤压墙-垫层料接触面要大, 反映了挤压墙-垫层料接触面粗糙度不同所带来的力学特性的差异。

表 2 挤压墙-垫层料接触面模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of contact surface between extrusion wall and cushion layer

挤压墙类型	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	$k$	$n$	破坏比 $R_f$
平面状	90.1	34.4	260.1	0.29	0.81
锯齿状(缩尺)	78.5	35.4	266.5	0.30	0.81

### 3.3 接触面模型拟合结果

式(1)拟合的室内试验的剪应力-剪切应变关系见图 16, 较好地描述了接触界面的力学特性。

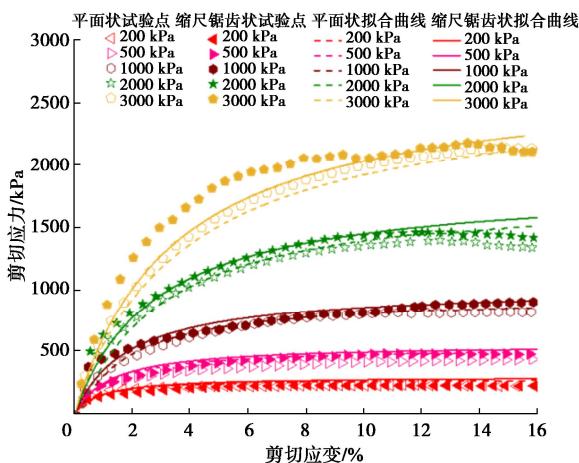


图 16 平面状及缩尺挤压墙接触面试验数据及拟合曲线

Fig. 16 Test data and fitting curves of contact surface on planar and reduced scale extrusion walls

## 4 结 论

通过挤压墙-垫层料接触面大型单剪试验辅以离散元法数值单剪试验模拟分析, 得到以下 3 点结论。

(1) 挤压墙-垫层料之间的接触区为有厚度的剪切错动带, 剪切错动带内的垫层料颗粒发生剪切位移、转动和错动, 距挤压墙越近垫层料颗粒的剪切位移、转动和错动越剧烈。

(2) 锯齿状挤压墙对于挤压墙-垫层料接触面力学特性有一定影响。锯齿状挤压墙-垫层料接触面的剪应力-剪切位移曲线高于平面状挤压墙-垫层料接触面的, 锯齿状挤压墙-垫层料接触区的垫层料颗粒的位移、转动和错动大于平面状挤压墙-垫层料接触区的。与平面状挤压墙相比, 单剪试验试件采用锯齿状挤压墙更贴近工程实际。

(3) 本文采用的接触面模型反映了挤压墙-垫层料接触面的力学特性, 该模型参数较少, 物理意义明

确, 编程简单。结合足尺锯齿状挤压墙-垫层料接触面的离散元仿真试验成果, 能够解决挤压墙锯齿试验缩尺问题, 从而有效提升面板堆石坝计算中混凝土面板应力-变形预测的准确性。

## 参考文献:

- [1] 贾金生, 郎能惠, 徐泽平, 等. 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (JIA Jinsheng, LI Nenghui, XU Zeping, et al. Study on Key Technology for the Safety of High CFRDs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 周小文, 龚壁卫, 丁红顺, 等. 砂砾石垫层-混凝土接触面力学特性单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 876-880. (ZHOU Xiaowen, GONG Biwei, DING Hongshun, et al. Large-scale simple shear test on mechanical properties of interface between concrete face and gravel underlayer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 876-880. (in Chinese))
- [3] 王艳丽, 饶锡保, 潘家军, 等. 砂砾石垫层料与混凝土面板接触面特性的大型单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1538-1544. (WANG Yanli, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. Mechanical behaviors of interface between sand-gravel cushion material and concrete face slab by large-scale simple shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1538-1544. (in Chinese))
- [4] 张国栋, 罗 麋, 杜 鹏. 三峡库区典型土石混合体与混凝土接触面大型剪切试验研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8): 149-152. (ZHANG Guodong, LUO Wen, DU Peng. Large shearing test on interface between typical earth-rock aggregate and concrete in Three Gorges Reservoir Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(8): 149-152. (in Chinese))
- [5] 李登华. 面板堆石坝接触面试验研究和本构模型的建立[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (LI Denghua. Experimental Study on Contact Surface of Concrete Face Rockfill Dam and Establishment of Constitutive Model[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [6] 张建民, 张 嘎, 刘 芳. 面板堆石坝挤压式边墙的概化数值模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 249-253. (ZHANG Jianmin, ZHANG Ga, LIU Fang. A simplified equivalent numerical model of extrusion-sidewall for CFRD and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 249-253. (in Chinese))
- [7] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试

- 验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1175-1179. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1175-1179. (in Chinese))
- [8] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 288-292. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 288-292. (in Chinese))
- [9] LIU S H, WANG Y S, SHEN C M. DEM analysis of granular crushing during simple shearing[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(5): 522-531.
- [10] XU D S, TANG Z Y, ZHANG L. Interpretation of coarse effect in simple shear behavior of binary sand-gravel mixture by DEM with authentic particle shape[J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 292-304.
- [11] ZHANG H, BOLDINI D, WANG L H, et al. Influence of block form on the shear behaviour of soft soil - rock mixtures by 3D block modelling approaches[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(6): 3279-3300.
- [12] XU W J, WANG S, ZHANG H Y, et al. Discrete element modelling of a soil-rock mixture used in an embankment dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 141-156.
- [13] 姜仲洋, 李志华, 张 聰. 基于颗粒流的新老混凝土加固构件轴压性能细观研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(2): 342-349. (JIANG Zhongyang, LI Zhihua, ZHANG Cong. Meso-study on the axial compression performance of new and old concrete reinforced members based on particle flow[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(2): 342-349. (in Chinese))
- [14] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合体—基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1947-1954. (YANG Zhongping, JIANG Yuanwen, LI Shiqi, et al. Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1947-1954. (in Chinese))
- [15] DESAI C S, ZAMAN M M, LIGHTNER J G, et al. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 19-43.
- [16] XU W J, HU L M, GAO W. Random generation of the meso-structure of a soil-rock mixture and its application in the study of the mechanical behavior in a landslide dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 166-178.

### 第三十一届全国土工测试学术研讨会（第 1 号通知） (中国·新疆·乌鲁木齐 2025 年 7 月 25 日)

为了推动“一带一路”战略实施, 促进新疆地区的岩土工程技术发展, 加强国内外专家学者的交流与合作, 第三十一届全国土工测试学术研讨会将于 2025 年 7 月 25 日—7 月 27 日在乌鲁木齐举行, 本次会议主题为“携手共建“一带一路”, 促进新疆岩土发展”。会议将汇聚国内外著名专家, 进行特邀报告和主题演讲, 并展示最新的土工测试设备和技术。我们诚挚邀请国内外的专家、学者和工程技术人员参与此次会议, 共同探讨解决新疆及“一带一路”沿线岩土工程难题的创新技术和解决方案。

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 中国水利学会岩土力学专业委员会。

**会议主题:** 冻土地质条件勘察和基本性质测试技术; 盐渍土原位测试和基本性质测试技术; 风积沙基本性质测试技术; 冻融环境下土工物理模型试验技术; 盐胀环境下土工物理模型试验技术; 地震活动区土工原位测试技术; 膨胀土性质测试技术; 粗粒土性质测试技术; 混合土性质测试技术; 土工测试新

型技术设备。

**论文征集:** 欢迎就本届研讨会交流内容提交论文, 论文将通过组委会审查、专家遴选推荐到《岩土工程学报》(增刊)(EI 收录)、《新疆大学学报(自然科学版)》、《水力发电》等期刊发表。论文篇幅一般在 5 页以内, 格式请参考《岩土工程学报》。此外部分论文会被推荐到《应用基础与工程科学学报》(EI 收录)、《长江科学院院报》、《人民长江》和《水利水电快报》进行发表, 其中《应用基础与工程科学学报》、《长江科学院院报》和《人民长江》会以专栏形式发表, 《水利水电快报》会以专刊形式发表。论文征集邮箱: geotest2025@126.com。2024 年 11 月 30 日前提交论文全文, 2024 年 12 月 31 日前返回论文录用通知, 2025 年 2 月 31 日前返回修改后论文。

**联系方式:** 地址: 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区华瑞街 777 号新疆大学(博达校区)建筑工程学院; 邮编: 830047; 联系人: 刘欢 15241828240, 秦溯 15160925936, 王存根 15299051092。

(会议组委会 供稿)