

DOI: 10.11779/CJGE201908019

# 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

王艳丽, 饶锡保, 潘家军, 左永振, 高盼

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 采用自主研制的低摩阻叠环式双向静动剪切试验机, 考虑面板与垫层间喷涂和不喷涂乳化沥青两种情况, 进行混凝土面板与砂砾石垫层料之间的大型剪切试验, 研究混凝土面板与垫层料接触面的力学特性, 基于 Clough 和 Duncan 非线性弹性本构模型整理出接触面模型参数, 并探讨了乳化沥青在接触面剪切变形中的作用机制。研究表明: ①不喷涂乳化沥青时, 接触面应力随着剪切位移的增加逐渐变大, 接触面剪应力与位移呈现出很好的双曲线关系。喷涂乳化沥青时, 接触面剪应力与剪切位移在峰值强度前呈现出很好的双曲线关系, 在峰值强度后, 呈现出一定的应变软化特性, 法向应力越低, 表现越为明显; ②两种情况下, 随剪切位移的增加, 上盒土体变形逐渐发展, 并由上到下逐渐增加, 最大的相对错动位移均发生在混凝土面板与垫层之间的接触面处, 表明接触面的抗剪强度小于砂砾石垫层的抗剪强度; ③法向应力对叠环的剪切位移有较大影响, 法向应力越大, 同一高度处叠环的剪切位移越大; 在相同的剪切位移和法向应力作用下, 喷涂乳化沥青时叠环水平位移均小于不喷涂时叠环水平位移; ④乳化沥青对接触面的力学参数有很大的影响, 采用 Clough 和 Duncan 非线性弹性本构模型拟合时, 与不喷涂乳化沥青时相比, 喷涂乳化沥青的接触面其劲度系数、指数及强度指标均有大幅度降低, 剪切过程中乳化沥青形成了完整的过渡层来隔离砂砾石垫层料和混凝土面板的直接接触, 并起到很好的阻隔-润滑效果。

**关键词:** 接触面; 乳化沥青; 砂砾石; 混凝土; 单剪试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)08-1538-07

**作者简介:** 王艳丽(1981—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事粗粒土力学特性与宏细观模拟方法等方面的研究。E-mail: wyldhh@126.com。

## Mechanical behaviors of interface between sand-gravel cushion material and concrete face slab by large-scale simple shear tests

WANG Yan-li, RAO Xi-bao, PAN Jia-jun, ZUO Yong-Zhen, GAO Pan

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** A series of large-scale shear tests are performed to study the contact characteristics between sand-gravel cushion and concrete structure with two types of interfaces, coated with and without emulsified asphalt by a self-developed large-scale bidirectional low friction laminar-ring simple shear apparatus. The nonlinear elastic constitutive model parameters based on Clough and Duncan of the interfaces are determined, and the effects of emulsified asphalt on shear deformation mechanism of the interface are discussed. The results show that: (1) With the increasing shear displacement, the shear stress of interface coated without emulsified asphalt increases and the curves of shear stress and shear displacement exhibit a good hyperbolic relationship. The curves of shear stress and shear displacement of interface coated with emulsified asphalt exhibit a good hyperbolic relationship before the peak strength. Certain strain softening properties are shown after the peak strength, which is different from that coated without emulsified asphalt. The lower the normal stress, the more obvious it is. (2) For the both cases, with the increasing shear displacement, the deformation of soils in the upper box develops, and gradually increases from top to bottom and the largest relative movement displacement occurs in the contact surface between concrete slabs and cushion layer, which show that the shear strength of the interface is less than that of the sand-gravel cushion. (3) The normal stress has a great influence on the shear

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779017, 51579237); 国家自然科学基金—雅砻江联合基金重点项目(U1765203); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017023/YT&CKSF2015051/YT)

收稿日期: 2018-01-07

displacement of the laminar ring, and the larger the normal stress, the greater the shear displacement of the laminar ring at the same height. Under the same shear displacement and normal stress, the horizontal displacement of the laminar ring coated with emulsified asphalt is less than the horizontal displacement coated without emulsified asphalt. (4) The emulsified asphalt has a great influence on the mechanical parameters of the interface. Compared with the interface coated without emulsified asphalt, the parameters of Clough and Duncan nonlinear elastic constitutive model of the interface coated with emulsified asphalt, such as the stiffness coefficient, index and intensity index, are greatly reduced. The emulsified asphalt forms a complete transition layer to isolate the direct contact between sand-gravel cushion and concrete face, and has a very good obstructing-lubricating effect in the shear process.

**Key words:** interface; emulsified asphalt; sand-gravel; concrete; simple shear test

## 0 引言

土石坝是水利水电工程中常用的坝型, 作为土石坝的重要分支, 近年来混凝土面板堆石坝得到了迅猛发展, 已逐渐成为世界上高土石坝建设的主流坝型之一。对面板坝而言, 砂砾石垫层与混凝土面板两者由于材料的不同, 其强度和变形特性相差很大, 在界面两侧常存在较大的剪应力并可能出现局部脱开、滑动、错位、张闭等非连续性变形现象, 对大坝的安全运营产生重要的影响。因此如何合理地描述这种接触面的力学特性成为广泛关注的热点研究课题之一。目前, 已有不少学者对土体与结构接触面特性进行了深入系统的研究, 在接触面试验方法<sup>[1-2]</sup>、本构模型<sup>[3-6]</sup>和数值模拟<sup>[7-9]</sup>等方面取得了丰硕的成果。在室内常采用直剪仪和单剪仪进行接触面力学特性的试验研究, Potyondy<sup>[10]</sup>于1961年首次采用直剪仪开展了土体与多种建筑材料接触面力学特性的研究, 随后周国庆<sup>[11]</sup>、冯大阔等<sup>[12]</sup>、陈俊桦等<sup>[13]</sup>均利用直剪仪研究土体与结构物接触面上的剪切力学性质。为了克服直剪仪剪切面相对固定的不足, 叠环式单剪仪被成功研制并在接触面研究中广泛应用。许多学者<sup>[14-23]</sup>对土体与结构接触面的静动力学特性进行了单剪试验研究, 研究对象包含砂土、粗粒土、红黏土、冻土等, 结构物材料有钢板、混凝土、沥青混凝土等。

实际工程中, 由于施工工艺的影响, 在混凝土面板与垫层料之间常设置乳化沥青保护层, 而乳化沥青的存在会影响接触面的力学特性, 使得其两侧材料的荷载分担比例发生变化。因此, 针对河北丰宁电站水库面板堆石坝拟采用的垫层料, 采用自主研制的大型低摩阻叠环式双向静动剪切试验机, 考虑面板与垫层间喷涂和不喷涂乳化沥青情况, 进行了混凝土面板与垫层料之间的大型剪切试验, 研究混凝土面板与垫层料之间的接触特性, 揭示混凝土面板与填料界面切应力-切位移规律, 提出适用于混凝土面板与填料之间接触面模型参数, 对准确分析面板的受力状态及大坝的安全稳定评价具有重要的科学意义和工程应用价

值。

## 1 接触面试验

### 1.1 试验设备

试验设备为长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室研制的低摩阻叠环式双向静动剪切试验机<sup>[24]</sup>。该仪器主要由承载机架、剪切盒、垂直加载装置、水平剪切加载装置、液压系统、计算机控制及数据采集系统6部分组成。仪器的长宽高为600 mm×600 mm×600 mm, 下部剪切盒高240 mm, 上部为7层叠环, 每层环高30 mm, 最大竖向荷载500 kN, 水平最大荷载1000 kN, 如图1所示。该仪器特点: ①采用多个薄层可活动刚性叠环替代常规直剪仪的上剪切盒, 克服直剪试验中剪切面单一固定的缺点; ②沿剪切方向, 在薄层刚性叠环左右两侧设置滚轴装置, 在整体式下剪切盒和上部刚性叠环两侧导向壁设置滚珠装置, 将滑动摩擦变为滚动摩擦, 极大降低了接触摩阻力, 提高了试验精度; ③垂直方向和水平方向的动力加载装置可用于测试试样的动强度指标及变形特性。该设备可用于研究土石料、结构与土的接触面、岩土与土工合成材料接触面的静动力学特性, 获得其强度和变形参数。



图1 大型叠环式剪切仪

Fig. 1 Large-scale laminar-ring simple shear apparatus

### 1.2 试验材料

试验所用垫层料为水库进出水口处开挖的砂砾石料, 最大粒径为60 mm, 平均粒径为14.5 mm, 不

均匀系数为 20, 曲率系数为 1.8, 为级配良好砾, 其级配曲线如图 2 所示。首先进行相对密度试验, 对于大于 5 mm 颗粒的相对密度试验采用虹吸筒法, 小于 5 mm 细颗粒试验采用相对密度瓶法, 然后根据各种粒径的百分含量, 取其加权平均值作为混合料的相对密度, 其值为 2.67; 然后进行相对密实度试验, 试验采用风干料, 试样筒尺寸为  $\Phi 300 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ 。最小干密度试验采用固定体积法, 最大干密度试验采用表面振动法, 测得试样的最大、最小干密度分别为 2.21,  $1.66 \text{ g/cm}^3$ , 制样过程中控制其干密度为  $2.19 \text{ g/cm}^3$ 。为了研究试验用砂砾石料的基本力学特性, 在长江科学院的大型应变式三轴试验仪上进行了高压三轴试验。试验结果如图 3 所示, 由图 3 可知, 该砂砾石料的应力应变曲线在低围压下有一定的软化趋势, 且在低围压下具有明显的剪胀现象。同时整理出砾石料的抗剪强度指标, 其黏聚力为  $131 \text{ kPa}$ , 内摩擦角为  $40.1^\circ$ 。

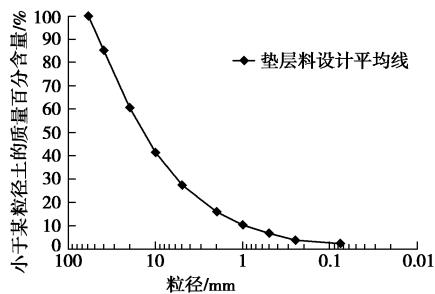


图 2 垫层料颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of cushion materials

制备混凝土板时, 所用的配合比(水:水泥:砂:石子)为  $0.5:1.0:1.5:3.0$ , 按规定配合比将其浇筑在模具里, 浇筑完毕后对混凝土板加以覆盖并保湿养护 28 d, 然后取出进行粗糙度测定。混凝土板尺寸为  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 可放置于下盒内。乳化沥青是由山东优索化工有限公司生产的阴离子乳化沥青, 主要成分是水、沥青、乳化剂和稳定剂, 常温下棕黑色液体, 固含量大于等于 50%, PH 值为  $7.0 \sim 9.5$ , 是一种良好的打底和防渗涂料。采用 Kishida 提出用相对粗糙度描述砂砾石与混凝土面板的接触面, 定义相对粗糙度  $R_n = R_{\max}/D_{50}$ , 其中  $R_{\max}$  为最大峰谷距,  $D_{50}$  为砂砾石的平均粒径。面板试样的平面尺寸为  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。量测的方法是: 在面板试样表面打上网格, 以某一角点为起始点, 将位移传感器逐次移动到各网格点上, 量测每点的高程。高程最大值和最小值之差即为最大峰谷距。经测量喷涂和不喷涂乳化沥青接触面的相对粗糙度分为 0.433 和 1.024, 喷涂乳化沥青后, 接触面更为光滑。

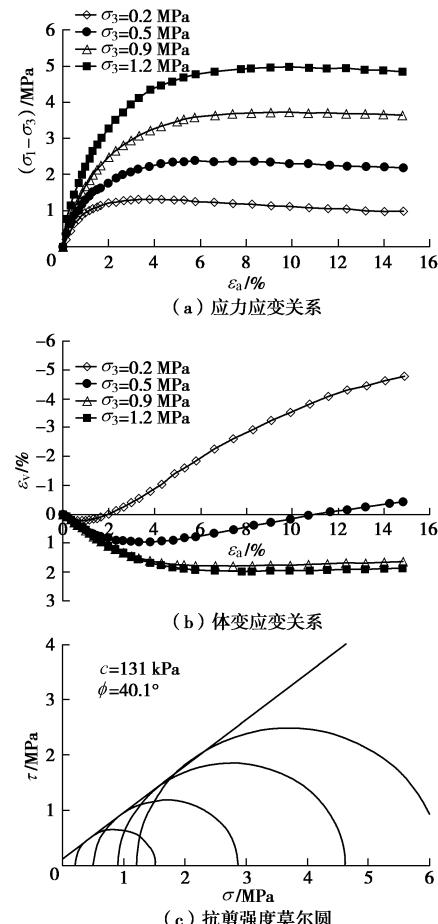
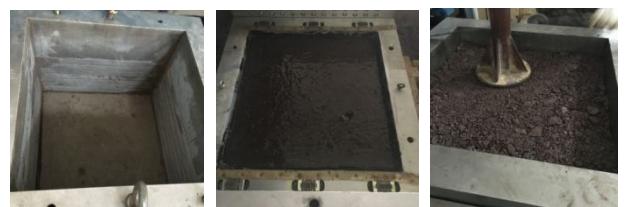


图 3 垫层料大型高压三轴试验成果

Fig. 3 Triaxial test results of cushion materials

### 1.3 试验方案

对混凝土面板与垫层料进行接触面剪切特性试验, 试验分面板与垫层间不喷涂乳化沥青(方案 1)和喷涂乳化沥青(方案 2)两种工况, 在下剪切盒中填装混凝土面板, 在上剪切盒中分 3 层填装垫层料, 装填时应防止大颗粒集中并控制每层的高度大致相同。击实时, 应使击锤自由铅直下落, 并且锤击点均匀分布于土面上, 试样的干密度与三轴试样相同, 均为  $2.19 \text{ g/cm}^3$ 。制样过程见图 4 所示。试样顶部的荷载采用等量分级加载, 剪切试验过程中, 试样顶部的荷载保持不变, 试样的上覆压力分别为  $100, 200, 300, 400 \text{ kPa}$ 。待试样在上覆压力作用下变形稳定后, 以  $1.0 \text{ mm/min}$  的剪切速率进行剪切试验, 当剪切变形达到  $60 \text{ mm}$  或达到试样直径的  $1/15 \sim 1/10$  为止。



(a) 下层混凝土成型 (b) 涂乳化沥青 (c) 装填上层砂砾石料

图 4 试验制样过程

Fig. 4 Preparation process of samples

## 2 试验结果分析

### 2.1 接触面强度特性

为了研究乳化沥青对砂砾石垫层料和混凝土面板接触面强度特性的影响, 分别对有、无乳化沥青保护层的接触面在不同上覆压力(100, 200, 300, 400 kPa)下剪切试验结果进行了对比分析。两种接触面材料的剪切应力与剪切位移关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 面板与垫层间不喷涂乳化沥青的情况下(方案 1), 接触面应力随着剪切位移的增加逐渐变大, 接触面剪应力与位移在呈现出很好的双曲线关系, 面板与垫层间喷涂乳化沥青的情况下(方案 2), 接触面剪应力与剪切位移在峰值强度前呈现出很好的双曲线关系, 在峰值强度后, 呈现出一定的应变软化特性, 法向应力越低, 表现越为明显。

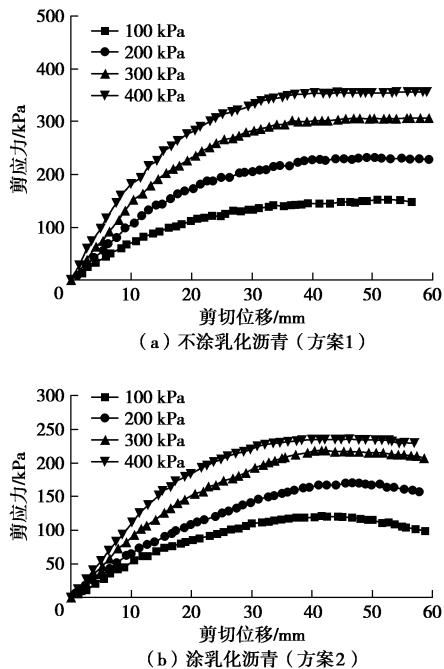


图 5 接触面剪应力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 5 Displacement and shear stress curves of interface

两种接触面材料的大型叠环剪切试验抗剪强度与竖向压力关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 抗剪强度与法向应力关系呈现良好的线性关系, 竖向应力越大, 剪应力的峰值也越大, 同时相同的竖向应力下, 乳化沥青保护层接触面(方案 2)的剪切应力小于无保护层接触面(方案 1)的剪切应力, 无保护接触面和乳化沥青保护接触面的黏聚力接近, 分别为 88.5 kPa 和 95 kPa, 摩擦角分别为  $34.5^\circ$  和  $20.5^\circ$ 。两种接触面抗剪强度与砂砾石料本身的抗剪强度(黏聚力 131 kPa 和内摩擦角  $40.1^\circ$ )相比, 均有大幅降低。有乳化沥青保护(方案 2)与无保护(方案 1)时相比, 其

内摩擦角降低 40.6%, 说明在剪切过程中乳化沥青形成了完整的过渡层来隔离砂砾石垫层料和混凝土面板的直接接触, 并起到很好的阻隔-润滑效果, 使接触面愈加光滑, 则摩擦角也愈小。在实际面板堆石坝工程中, 面板与垫层料之间喷涂乳化沥青能有效降低接触面的抗剪强度, 有利于面板和堆石体之间的自由协调变形, 同时乳化沥青又具有很好的防渗性能, 对改善面板的防渗效果起积极的作用。

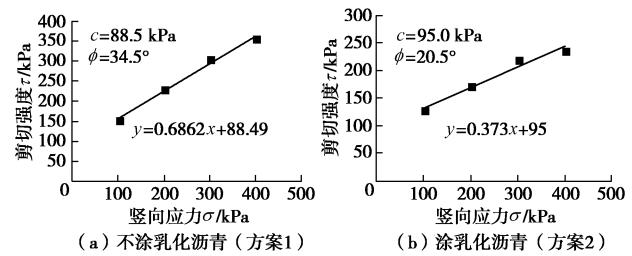


图 6 接触面抗剪强度与竖向压力关系曲线

Fig. 6 Relationship between shear strength and normal stress of interface

### 2.2 接触面变形特性

试验设定的最终剪切位移为 60 mm, 此时应变已经达到 10%, 强度峰值已经出现, 但实际上, 有个别试样的最终剪切位移未达到而是趋近 60 mm, 为分析在剪切位移相同时, 喷涂乳化沥青对接触面变形特性的影响, 图 7(a), (b) 给出了剪切位移为 55 mm 时叠环水平位移沿试样高度的分布。由图可知, 两种型式的接触面水平位移沿试样高度的变化规律相似。随剪切位移的增加, 上盒土体变形逐渐发展, 并由上到下逐渐增加, 最大的相对错动位移均发生在第 1 层叠环与下剪切盒之间, 即混凝土面板与垫层之间的接触面处。这表明接触面的抗剪强度小于砂砾石垫层本身的抗剪强度, 剪切破坏发生在接触面处。同时, 法向应力对叠环的剪切位移有较大影响, 法向应力越大, 同一高度处叠环的剪切位移越大。图 7(c) 给出了不涂乳化沥青(方案 1)和涂乳化沥青(方案 2)两种情况下试验结束时叠环水平位移对比结果, 由图可知, 在相同的剪切位移和法向应力作用下, 涂乳化沥青(方案 2)中叠环水平位移均小于不涂乳化沥青(方案 1)中叠环水平位移, 这种现象在不同法向应力的试验中均有表现, 这说明乳化沥青的润滑作用非常明显, 下盒沿接触面滑动的同时, 对上盒土体的带动作用有效减弱, 从而使上盒土体的剪切位移减小。

## 3 接触面模型与参数

土体和结构物之间的接触面变形研究, 主要包含两个方面: ①接触面上的本构关系, 尤其是剪应力和剪切变形之间的关系; ②接触面单元, 它是有限元计

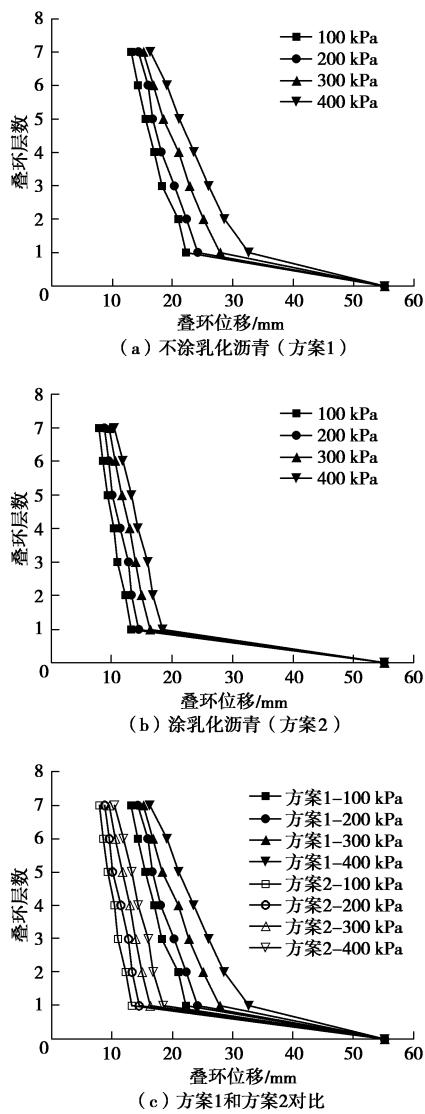


图 7 剪切位移沿试样高度分布

Fig. 7 Shear displacements along height direction of samples

算中用以模拟接触面变形的一种特殊单元。而对于土与结构接触面本构模型的研究已经建立了不少数学模型, 具有代表性模型如 Clough 和 Duncan 非线性弹性本构模型<sup>[3]</sup>, 本文将对以上典型模型进行拟合分析。

Clough 等认为剪应力和相对剪切位移存在双曲线关系, 即剪切应力  $\tau$  与剪切位移  $\omega_s$  之间存在双曲线模式, 即

$$\tau = \frac{\omega_s}{a + b \cdot \omega_s} \quad (1)$$

式中,  $a$ ,  $b$  为反映接触面性质的两个参数, 参数  $a$  为初始剪切劲度  $\kappa_{si}$  的倒数, 即  $a = 1/\kappa_{si}$ , 参数  $b = R_f / \tau_f$ ,  $\tau_f = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c$  为接触面的抗剪强度,  $R_f$  为破坏比。而初始剪切劲度  $\kappa_{si}$  为接触面上法向应力  $\sigma_n$  的幂函数:

$$\kappa_{si} = \kappa_i \cdot \gamma_w \cdot \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

式中  $\kappa_i$  为无因次的劲度系数;  $n$  为劲度指数;  $\varphi$  为接触面的内摩擦角;  $c$  为接触面的黏聚力 (kPa);  $p_a$  为大气压力, 与法向应力  $\sigma_n$  为同一单位 (kPa);  $\gamma_w$  为水的重度 (10 kN/m<sup>3</sup>);  $\tau_f$  为接触面的破坏强度 (kPa)。

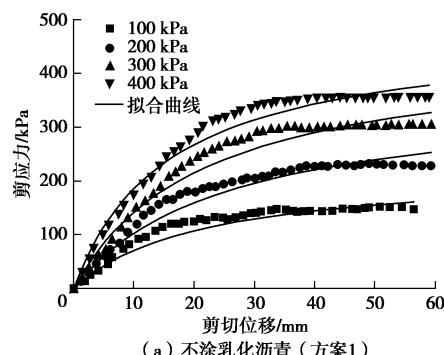
模型共有  $k_i$ ,  $n$ ,  $R_f$ ,  $\varphi$ ,  $c$  5 个参数。上述 5 个材料参数均可由一组接触面单剪试验确定。

根据前述接触面单剪试验成果, 可以求得接触面 Clough-Duncan 非线性模型参数如表 1 所示。由表 1 可知, 喷涂乳化沥青 (方案 2) 与不喷涂乳化沥青 (方案 1) 相比, 由于接触面相对光滑, 其接触面剪切劲度模数  $k$  和指数  $n$  有较大程度降低。根据表 1 所示的参数, 对接触面试验的结果进行了反算, 拟合结果与试验成果的对比如图 8 所示。从图 8 中可看出: 用整理出的参数所计算出的理论预测值与实测值, 在峰值强度前, 即应变硬化段理论预测值与实测值吻合较好, 符合双曲线假定, 峰值后的软化段仍用双曲线模型拟合已不适用, 须进一步改进计算模型。

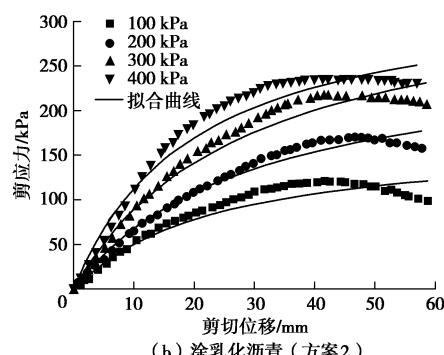
表 1 接触面模型参数

Table 1 Parameters for interface models

接触面类型	劲度系数 $k_i$	劲度指数 $n$	破坏比 $R_f$	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	黏聚力 $c/kPa$
不喷涂乳化沥青	9699	0.758	0.703	34.5	88.5
涂喷乳化沥青	6744	0.587	0.648	20.5	95.0



(a) 不喷涂乳化沥青 (方案1)



(b) 涂乳化沥青 (方案2)

图 8 拟合结果示意图

Fig. 8 Fitted results from data of test-simulation

## 4 结 论

采用自主研制的大型双向低摩阻叠环剪切仪进行了砂砾石垫层料与混凝土面板面间喷涂与不喷涂乳化沥青条件下的大型单剪试验, 通过对比分析, 揭示了两种接触面力学特性的规律, 提出混凝土面板与垫层料之间接触面模型参数, 并探讨了乳化沥青在粗粒土结构面剪切变形中的作用机制, 得出以下4点结论。

(1) 不喷涂乳化沥青的情况下(方案1), 接触面应力随着剪切位移的增加逐渐变大, 接触面剪应力与位移在呈现出很好的双曲线关系, 喷涂乳化沥青的情况下(方案2), 接触面剪应力与剪切位移在峰值强度前呈现出很好的双曲线关系, 在峰值强度后, 呈现出一定的应变软化特性, 法向应力越低, 表现越为明显。

(2) 两种型式的接触面水平位移沿试样高度的变化规律相似。随剪切位移的增加, 上盒土体变形逐渐发展, 并由上到下逐渐增加, 最大的相对错动位移均发生在混凝土面板与垫层之间的接触面处, 表明接触面的抗剪强度小于砾石垫层的抗剪强度。

(3) 法向应力对叠环的剪切位移有较大影响, 法向应力越大, 同一高度处叠环的剪切位移越大。在相同的剪切位移和法向应力作用下, 涂乳化沥青(方案2)中叠环水平位移均小于不涂乳化沥青(方案1)中叠环水平位移, 这种现象在不同法向应力的试验中均有表现。

(4) 有无乳化沥青对接触面的力学参数有很大的影响, 采用Clough和Duncan非线性弹性本构模型拟合时, 与无保护接触面相比, 喷涂乳化沥青的接触面其劲度系数、指数及强度指标均有大幅度降低, 剪切过程中乳化沥青形成了完整的过渡层来隔离砂砾石垫层料和混凝土面板的直接接触, 并起到很好的阻隔-润滑效果。

## 参考文献:

- [1] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21–25. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 21–25. (in Chinese))
- [2] 朱俊高, SHAKIR R R, 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692–696. (ZHU Jun-gao, SHAKIR R R, YANG You-lian, et al. Comparison of behaviors of soil-concrete interface from ring-shear and simple shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692–696. (in Chinese))
- [3] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. J Soil Mech and Found Engrg Div, ASCE, 1971, 97(12): 1657–1674.
- [4] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 6–11. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 6–11. (in Chinese))
- [5] 卢廷浩, 鲍伏波. 接触面薄层单元耦合本构模型[J]. 水力学报, 2000(2): 71–75. (LU Ting-hao, BAO Fu-bo. A coupled constitutive model for interface thin-layer element[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(2): 71–75. (in Chinese))
- [6] 龙 焰, 张家生, 陈俊桦. 结构接触面剪切特性及软硬化损伤模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 128–134. (LONG Yao, ZHANG Jia-sheng, CHEN Jun-hua. Shear characteristics of structure interface and its strain-softening and hardening damage model[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(12): 128–134. (in Chinese))
- [7] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. J Soil Mech and Found Engrg Div, ASCE, 1968, 94(3): 637–660.
- [8] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 793–815.
- [9] 胡启军, 蒋 晶, 徐亚辉, 等. 红层泥岩桩-岩接触面本构模型试验及数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 122–128. (HU Qi-jun, JIANG Jing, XU Ya-hui, et al. Interface constitutive model test and numerical simulation of red mudstone pile-rock[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 122–128.
- [10] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction material[J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339–345.
- [11] 周国庆, 夏红春, 赵思光. 深部土体-结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157–1162. (ZHOU Guo-qing, XIA Hong-chun, ZHAO Si-guang. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1157–1162. (in Chinese))
- [12] 冯大阔, 侯文峻, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维力学

- 特性的直剪试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 169 - 175. (FENG Da-kuo, HOU Wen-jun, ZHANG Jian-min. Large-scale direct shear test investigation of the 3 D behavior of a gravel-structure interfaces[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 169 - 175. (in Chinese))
- [13] 陈俊桦, 张家生, 李键. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 22 - 30. (CHEN Jun-hua, ZHANG Jia-sheng, LI Jian. Experimental research on mechanical characteristics of cohesive soil-structure interface by considering its roughness[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science), 2015, 47(4): 22 - 30. (in Chinese))
- [14] UESUGI M, KISHIDA H, TSUBAKIHARA Y. Friction between sand and steel under repeated loading[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(3): 127 - 137.
- [15] EVGIN E, FAKHARIAN K. Cyclic rotational simple-shear behavior of sand-steel interfaces[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2): 191 - 199.
- [16] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(12): 1098 - 1105.
- [17] DESAI C S, PRADHAN S K, COHEN D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 286 - 294.
- [18] 高俊合, 俞海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 42 - 46. (GAO Jun-he, YU Hai-xue, ZHAO Wei-bing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 42 - 46. (in Chinese))
- [19] 周小文, 龚壁卫, 丁红顺, 等. 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 Xiao-wen, GONG Bi-wei, DING Hong-shun, 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))
- [20] 彭凯, 朱俊高, 张丹, 等. 粗粒土与混凝土接触面特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1893 - 1900. (PENG Kai, ZHU Jun-gao, ZHANG Dan, et al. Study of mechanical behaviors of interface between coarse-grained soil and concrete by simple shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1893 - 1900. (in Chinese))
- [21] 冯大阔, 张建民. 粗粒土与结构接触面静动力学特性的大型单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1201 - 1208. (FENG Da-kuo, ZHANG Jian-min. Monotonic and cyclic behaviors of coarse-grained soil-structure interface using large-scale simple shear device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1201 - 1208. (in Chinese))
- [22] 刘容地, 郑建国, 李致远. 砂砾石与混凝土接触面力学性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(6): 834 - 841. (LIU Rong-di, ZHENG Jian-guo, LI Zhi-Yuan. Experimental research on mechanical properties of interface between concrete and gravel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45(6): 834 - 841. (in Chinese))
- [23] 邵生俊, 王强, 吴飞洁. 一种新型动单剪仪的研发与试验验证[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1841 - 1848. (SHAO Sheng-jun, WANG Qiang, WU Fei-jie. Development and test verification of a new cyclic simple shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1841 - 1848. (in Chinese))
- [24] 饶锡保, 江泊洧, 潘家军, 等. 一种低摩阻叠环式双向动剪切试验机: CN201620559350.6[P]. 2016-11-16. (RAO Xi-bao, JIANG Ji-wei, PAN Jia-jun, et al. A low friction-resistance ring type bidirectional dynamic shear test machine: CN201620559350.6[P]. 2016-11-16. (in Chinese))