

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2286

# 地下工程衬砌与减震层接触面力学特性 直剪试验及数值仿真研究

赵坤<sup>1,2</sup>, 陈卫忠<sup>1,3</sup>, 赵武胜<sup>1</sup>, 杨典森<sup>1</sup>, 宋万鹏<sup>1,2</sup>, 李灿<sup>1,2</sup>, 马少森<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049;

3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 泡沫混凝土作为隧道减震材料在抵抗地震压剪荷载方面具有重要作用, 为了研究减震层-衬砌接触面在地震压剪荷载作用下的破坏特征与剪应力演化规律, 利用 RMT-150C 电液伺服试验机开展了二者接触面在不同法向应力下的直剪试验, 获得了剪应力-剪切位移、峰值强度、残余强度、剪切刚度的变化规律及接触面的破坏特征和物态变化。同时根据有限元模拟结果, 探究接触面上剪应力的分布及演化规律。研究表明: 泡沫混凝土-衬砌接触面的破坏特征受法向应力与泡沫混凝土密度共同影响, 其剪应力-剪切位移曲线形态可归结为三种类型且随泡沫混凝土密度和法向应力的变化可以相互转化; 泡沫混凝土密度及法向应力对接触面峰值强度、残余强度及剪切刚度的影响是相互的, 且法向应力的影响权重较大。最后根据剪应力-剪切位移曲线的变化规律, 提出了复合指数模型来反映泡沫混凝土-衬砌接触面在压剪作用下损伤演化及摩擦滑移过程, 研究结果可以为更加有效的抗减震设计提供一定参考。

**关键词:** 接触面; 直剪试验; 数值模拟; 泡沫混凝土; 复合指数模型

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)07-0000-09

## Direct shear test and numerical simulation for mechanical characteristics of contact surface between lining and shock absorption layer of underground engineering

ZHAO Kun<sup>1,2</sup>, CHEN Wei-zhong<sup>1,3</sup>, ZHAO Wu-sheng<sup>1</sup>, YANG Dian-sen<sup>1</sup>, SONG Wan-peng<sup>1,2</sup>, LI Can<sup>1,2</sup>, MA Shao-sen<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Geotechnical and structural engineering research center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract:** The foam concrete serving as tunnel damping material plays an important role in resisting seismic compression-shear load. In order to study the failure characteristics and shear stress evolution law of the contact surface between lining and shock absorption layer, the direct shear tests under different normal stress were carried out on RMT-150C electro-hydraulic servo testing machine. The variation of shear stress-shear displacement curves, peak strength, residual strength, shear stiffness as well as the failure characteristics and physical state change of contact surface were obtained after the direct shear tests. Meanwhile, according to the results of FEM simulation, the distribution and evolution law of shear stress in contact surface were studied. The results show that the failure characteristics in foam concrete-lining contact surface were affected by normal stress and density of foam concrete; in addition, the shear stress-shear displacement curves could boil down to three types which could generate mutual transformation along with the change of foam concrete density and the normal stress. The influence of foam concrete density and normal stress on peak strength, residual strength and shear stiffness was interacting, and the normal stress weights higher. Finally the composite index model was proposed according to the variation of shear stress-shear displacement curves to reflect the damage evolution and friction slip process of contact surface between foam concrete and lining under compressive-shear condition. The results can provide certain reference for more effective aseismic design.

**Key words:** contact surface; direct shear test; numerical simulation; foam concrete; composite index model

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057906); 国家杰出青年科学基金(No. 51225902); 国家自然科学基金青年基金(No. 51409245) The work was supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program)(2015CB057906), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51225902) and National Natural Science Foundation of China(NSFC) for Youth(No.51409245)

第一作者简介: 赵坤, 女, 1989年生, 博士研究生, 主要从事地下工程地震响应及抗减震研究方面的工作。E-mail: zhaokun1029@sina.com

通讯作者: 陈卫忠, 男, 1968年生, 博士, 现任研究员、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

## 1 引言

随着交通线路的不断延伸、扩展,隧道不可避免会穿越地震活动区,使得隧道抗减震问题尤为突出,泡沫混凝土作为一种良好的减震材料被越来越多的应用于隧道结构减震层中。地震发生时,减震层因与衬砌存在刚度差异而产生不同程度的压剪或拉剪变形,吸收衬砌与地层之间的应变和相对位移,从而可以有效保护衬砌结构。理清减震层与衬砌间接触力学特性、变形特征对于隧道减震设计及施工具有较大的指导意义<sup>[1-2]</sup>。为研究减震层与衬砌接触面在压剪组合作用下的破坏特征和剪切力学特性,拟开展二者接触面直剪试验。

直剪试验由于操作简便,试验历时短等优点在研究不同材料接触面的力学及变形特性等方面获得广泛应用。张嘎<sup>[3-5]</sup>等、冯大阔<sup>[6]</sup>等通过单调和循环加载试验研究接触面的损伤演化过程,建立了接触面的损伤本构模型,并在面板堆石坝中得到较好应用。徐泽友<sup>[7]</sup>等利用单剪和直剪试验研究高塑性黏土与结构接触面的剪应力-应变的关系,同时讨论了接触面上抗剪强度的变化规律。周国庆<sup>[8]</sup>等通过直接试验研究了不同法向应力及粗糙度等因素对土-结构接触面力学特性的影响及各个因素之间的相关性。刘博<sup>[9]</sup>等研究了接触面起伏角、岩石强度、法向应力等因素在循环剪切试验下对接触面力学及变形特性的影响规律。张茜<sup>[10]</sup>等分析了不同法向压力下粗粒土对接触面强度及变形的影响,同时研究了颗粒在试验过程中的运动规律。曹平<sup>[11]</sup>等通过直剪试验及扫描仪从宏观上研究了不同法向应力在剪切过程中对节理面的形貌变化及抗剪强度的影响。周文<sup>[12]</sup>等着重研究了不同起伏角对接触面剪应力、摩擦角及破坏模式的影响规律,以及剪应力与正应力间的相关性。王江营<sup>[13]</sup>等依托大型直剪仪,利用正交设计方案研究了含水率、干湿循环、含石量、岩性与土性等对土石混合体强度特性的影响规律及权重。易成<sup>[14]</sup>等通过直剪试验研究分析砂浆和混凝土制备的一体两介质、两体两介质试样的接触面上应力-位移曲线及其试验后的接触面破坏形态,同时利用形状因子来描述接触面形貌的变化。以上成果在宏观与细观方面研究了接触面的强度与变形特征,对后文直剪试验的开展具有借鉴意义。

数值模拟可以通过界面的应力演化再现剪切试验过程,前人基于数值模拟对接触面渐进破坏过程进行了大量研究,取得了一系列成果。郑立宁<sup>[15]</sup>等通过 FISH 语言建立具有应变软化本构关系的接触

单元,从细观上研究了岩石-土接触面在直剪试验中的渐进破坏过程。易成<sup>[16]</sup>等利用有限元分析不同界面和应力边界条件下的接触面特性,得到了接触面上剪应力、剪胀性的变化规律。李晓峰<sup>[17]</sup>等结合直剪试验和数值模拟分别从宏观和细观角度研究了类节理岩石的剪切特性,其对于剪切特性的细观数值模拟方法值得借鉴。M.Bahaaddini<sup>[18]</sup>等、Jung-Wook Park<sup>[19]</sup>等通过数值模型着重研究了不同起伏角、摩擦系数、粗糙度、粘结强度下接触面的剪切力学特性。然而以上研究多局限于土与岩石或结构物的接触面,较少涉及到减震层中经常使用的泡沫混凝土等大孔隙材料,且大多仅分析接触面上剪应力等力学特性的分布规律,而忽略了接触面上剪应力、颗粒迁移、滑动等特性的演化规律。鉴于此,本文拟在直剪试验结果的基础上,利用 Abaqus 有限元分析软件建立新型接触面模型,分析减震层与衬砌接触面上剪应力演化规律。

综上所述,本文依据减震层与衬砌的相互作用设计了直剪试验方案,探究减震层与衬砌接触面的剪切破坏特征以及力学特性。通过研究不同密度及不同法向应力下减震层与衬砌接触面上的剪应力-剪切位移曲线、峰值强度、残余强度、剪切刚度的变化规律,以及试样整体的破裂形貌和物态变化,分析界面在压剪荷载作用下的响应特性,并通过数值模拟从细观上分析界面剪应力的演化规律,从而为深入研究地震荷载作用下衬砌与减震层之间的相互作用提供数据支持,为更加有效的抗减震设计提供参考依据。

## 2 泡沫混凝土-衬砌接触面直剪试验

### 2.1 直剪试验方案

由于剪切试样体积较小,若采用实际衬砌的混凝土材料,则其粗骨料粒径较大易造成界面不完全接触而影响试验结果,因此采用水泥砂浆代替衬砌混凝土。水泥砂浆采用 32.5 级水泥、中砂、水按照 1:5.27:1.16 的配合比搅拌、浇筑、振捣,与预制泡沫混凝土试块<sup>[2]</sup>在模具中浇筑成一个整体。砂浆在自重作用下下沉凝固,有效避免了养护期水泥砂浆体积收缩造成的与泡沫混凝土接触不良问题,浇筑结束 24h 后拆模,标养 15 天。

本次试验水泥砂浆均采用同一配合比,下文所述密度均指泡沫混凝土的密度。将试块按照 *D-P-N* 进行编号, *D* 表示泡沫混凝土密度, *P* 表示法向应力, *N* 表示试样编号。同一密度和法向应力下制备三个试样,试验方案如表 1 所示。

表 1 直剪试验方案

Table 1 The scheme of direct shear test

密度 $D/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	法向应力 $P/\text{MPa}$					
	0.1	0.2	0.5	0.8	1.0	2.0
260	√	√				
600			√	√	√	
750				√	√	√

直剪试验采用武汉岩土力学研究所自制的 RMT-150C 数控式电伺服试验机。该试验机操作方便，控制性能好，自动化程度高，且由于水平和竖向加载均是伺服控制，能很好的跟踪岩石的瞬间破裂；同时整个剪切装置和机体其它部分的各个接触面都装有减摩滑动体，大大减小了附加摩擦力。试验首先以 0.5kN/s 的速率缓慢施加法向荷载至设计值并保持不变，随后以 0.01mm/s 的速率施加剪应力直至试件破坏，试样及试验仪器如图 1 所示。



图 1 泡沫混凝土-水泥砂浆试样及 RMT-150C 伺服试验机  
Fig.1 The foam concrete-cement mortar specimen and RMT-150C electro-hydraulic servo testing machine

## 2.2 直剪试验结果分析

### 2.2.1 试样破坏形态

试样整体破坏形态如图 2 所示。

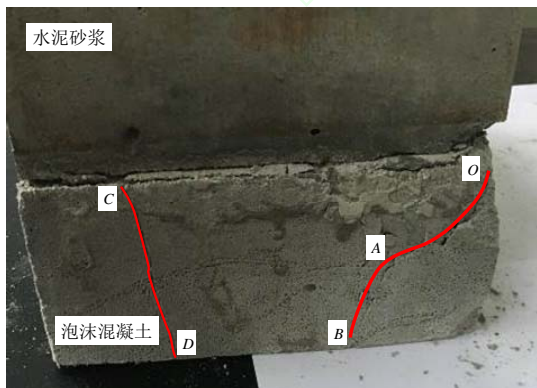


图 2 泡沫混凝土-水泥砂浆试样整体破坏形态  
Fig.2 Overall failure modes of foam concrete-cement mortar specimen

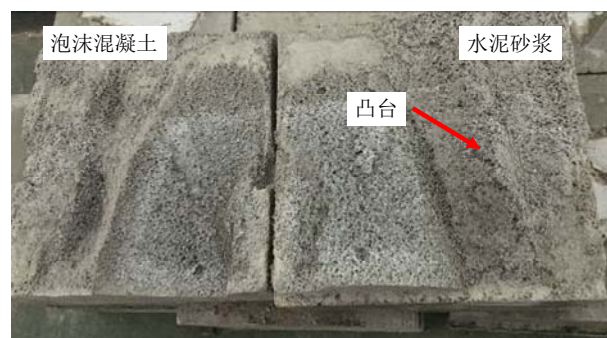
剪切过程中泡沫混凝土周侧出现碎屑剥落，部

分接触面处泡沫混凝土破碎严重，并随着剪切过程的推移出现贯通裂纹  $OAB$  和  $CD$ 。压剪作用下， $O$  点处剪应力集中首先产生剪切裂纹，应力集中程度随与加载端的距离增大逐渐减弱，裂纹  $CD$  近似呈直线，即受剪应力影响较小，主要是在法向压应力作用下产生的柱状劈裂。两条裂纹的出现说明剪应力不但随加载端距离的增大而逐渐减小，在接触面上的分布亦是不均匀的，这也说明接触面在剪切力作用下具有渐进破坏特征。

试样接触面剪切破坏形态有两种，如图 3 所示：①界面剪切破坏；②泡沫混凝土被剪坏。低密度低法向应力(如 260-0.1-1)或者高密度泡沫混凝土(如 750-0.5-2)易发生接触面剪切破坏，如图 3(a)所示。剪应力达到界面抗剪强度后，损伤演化迅速，应力陡降，接触面破坏，破坏面上颗粒间摩擦力提供峰后残余剪应力，此时破坏面较平整。当泡沫混凝土抗剪强度低于接触面抗剪强度时，破坏面发生于泡沫混凝土内部，此时泡沫混凝土和砂浆接触面基本完好，而泡沫混凝土内部被剪坏，产生凹凸不平的界面，如图 3(b)所示。



(a) 界面剪切破坏



(b) 破坏面在泡沫混凝土内部

图 3 泡沫混凝土-水泥砂浆试样剪切破坏形态  
Fig.3 Failure modes of foam concrete-cement mortar Specimen

### 2.2.2 剪应力-剪切位移及法向位移-剪切位移曲线

剪应力-剪切位移曲线及法向位移-剪切位移曲线随密度及法向应力不同而差别较大。同一密度及

法向应力下的试样峰值强度及残余强度曲线也存在离散性, 这是由试样本身结构特造成的。不同密度及法向应力下曲线可归结为图4所示的三种类型。

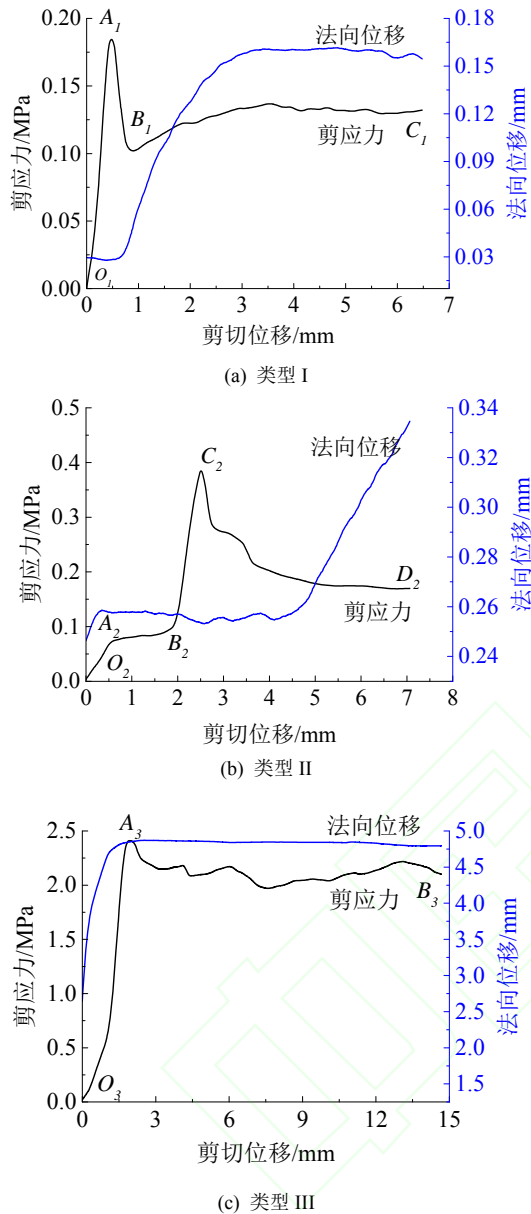


图4 典型剪应力-剪切位移全过程曲线  
 Fig.4 The typical full curves of shear stress-shear displacement

类型 I (见图 4a):  $O_1$ - $A_1$  段, 剪切初始, 竖向位移基本不变, 剪应力随剪切位移迅速增大;  $A_1$ - $B_1$  段, 随着剪切位移的增大剪应力急剧下降, 接触面粘结强度迅速损伤;  $B_1$ - $C_1$  段, 接触面粘结强度完全损伤, 摩擦强度逐渐增大, 最终趋于稳定摩擦滑移。

类型 II 见图 4b):  $O_2$ - $A_2$  段, 接触面抗剪强度随泡沫混凝土密度的增大而产生较大幅度的增强, 此时抗剪强度较小的泡沫混凝土会率先产生弹性变形, 同时竖向位移曲线迅速增大, 表明泡沫混凝土内部空隙在压剪作用下进一步致密。 $A_2$ - $B_2$  段, 随着

剪切位移的增大, 泡沫混凝土中部分区域发生屈服产生塑性变形, 剪应力-剪切位移曲线出现屈服台阶。 $B_2$ - $C_2$  段, 剪切位移继续增大, 泡沫混凝土产生应变硬化而大大提高了剪切强度, 此时接触面开始产生破坏, 由于接触面颗粒在前述剪切进程中排列的更加致密, 使得剪切刚度显著增大。 $C_2$ - $D_2$  段, 接触面部分区域逐渐产生脱粘现象, 剪应力-剪切位移曲线稳步下降, 直至接触面完全破坏, 剪应力全部由界面摩擦力提供, 从而达到稳定滑移状态。法向位移随着接触面颗粒的破碎、滑出, 显著增大。应当注意, 接触面剪应力-剪切位移曲线并不是  $O_2$ - $A_2$ - $B_2$ - $C_2$ - $D_2$  段, 而只是  $B_2$ - $C_2$ - $D_2$  段。

类型 III 见图 4c):  $O_3$ - $A_3$  段, 压剪作用下, 孔隙进一步致密, 有效接触面积进一步增大, 随着孔隙的致密, 法向位移变化速率减缓。剪切初始, 接触面颗粒在压剪作用下迅速屈服, 剪应力增长较缓慢, 随后接触颗粒重新排列、楔紧而产生应变硬化, 剪切刚度迅速增大;  $A_3$ - $B_3$  段, 随着剪切位移的增大, 接触面产生脱粘, 由于法向应力及试样密度较大, 接触面提供了较大的摩阻力, 使得应力降显著减小, 破坏面无法继续扩大, 从而竖向位移几乎无变化。

试样峰值剪应力、残余剪应力、剪切刚度及剪应力-剪切位移曲线类型如表 2 所示。

表 2 不同法向应力及密度下试样的剪切特性及分类  
 Table 2 The shear characteristics and classification of specimen under different normal stress and densities

密度 $D/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	法向应力 $P/\text{MPa}$	峰值剪应力 $\tau_p/\text{MPa}$	残余剪应力 $\tau_r/\text{MPa}$	剪切刚度 $\text{MPa}/\text{mm}$	曲线 类型
260	0.1	0.21	0.10	0.157	I
	0.1	0.20	0.11	0.157	I
	0.1	0.32	0.16	0.157	II
	0.2	0.29	0.18	0.174	II
	0.2	0.35	0.23	0.174	I
	0.2	0.39	0.22	0.174	II
	0.5	0.82	0.49	0.602	II
	0.5	1.01	0.56	0.602	II
	0.5	0.98	0.47	0.602	II
	0.8	1.10	0.64	0.658	II
600	0.8	1.12	0.72	0.658	II
	0.8	1.17	0.72	0.658	II
	1.0	1.16	0.84	0.915	II
	1.0	1.09	0.92	0.915	II
	1.0	1.11	0.90	0.915	II
	0.5	0.76	0.53	0.522	II
	0.5	0.57	0.43	0.522	II
	0.5	0.71	0.48	0.522	II
750	1.0	1.31	0.97	0.869	II
	1.0	2.34	1.06	0.869	II
	1.0	1.04	0.97	0.869	III
	2.0	2.42	2.18	0.458	III
	2.0	1.82	1.60	0.458	III
	2.0	1.47	1.38	0.458	III

不同试样泡沫混凝土密度不同, 加载法向应力不同, 导致剪应力-剪切位移曲线经历不同程度的弹性、塑性、脱粘破坏等阶段。泡沫混凝土密度较小时, 如  $260\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  的泡沫混凝土, 由于其本身孔隙不均匀, 导致界面粘结强度较低, 剪切破坏既有发生在泡沫混凝土内部的情况, 又有发生界面破坏的情况, 故曲线形式为类型 I 和 II 均有。

### 3 法向应力及密度对剪切特性影响

#### 3.1 峰值剪应力与残余剪应力

由上述试验结果可知峰值及残余剪应力受法向应力及泡沫混凝土密度共同影响, 将二者对峰值及残余剪应力的影响进行曲面拟合, 如图 5、6 所示。

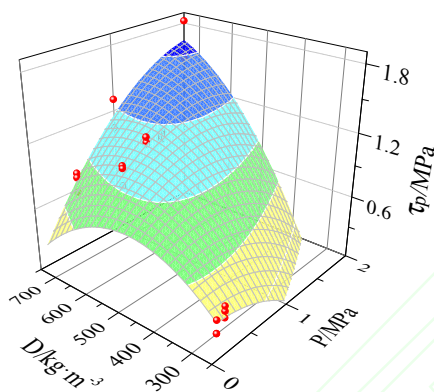


图 5 法向应力及密度对峰值剪应力的影响

Fig.5 The influence of normal stress and density on peak shear stress

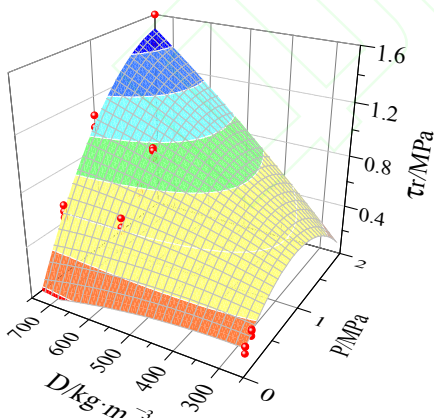


图 6 法向应力及密度对残余剪应力的影响

Fig.6 The influence of normal stress and density on residual shear stress

由拟合曲面可知, 峰值剪应力及残余剪应力随法向应力的变化较剧烈, 随泡沫混凝土密度的变化较平缓。泡沫混凝土密度较小时, 峰值剪应力随着法向应力的增大而减小, 原因是泡沫混凝土自身胶

结弱发生破碎; 密度增大到一定程度时, 峰值剪应力随着法向应力的增大先增大后减小; 当密度继续增大后, 峰值剪应力随法向应力的增大而不断增大。残余剪应力随法向应力及密度的变化规律与峰值剪应力类似, 但残余剪应力随法向应力的增大而迅速增大, 说明当法向应力不断增大时, 接触面达到峰值剪应力后的应力跌落逐渐减小。

#### 3.2 剪切刚度

接触面剪切刚度是反映剪切变形性质、估算岩体力学参数及计算岩体稳定性的重要指标, 不同法向应力及泡沫混凝土密度对剪切刚度的影响拟合曲面如图 7 所示。

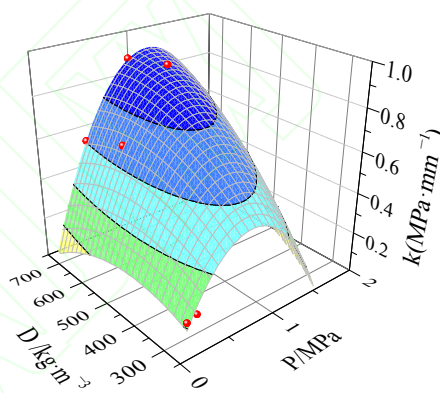


图 7 法向应力及密度对剪切刚度的影响

Fig.7 The influence of normal stress and density on shear stiffness

由图 7 可知, 剪切刚度随法向应力和密度的变化规律不同, 且随法向应力变化幅度较大。同一密度下, 剪切刚度随着法向应力的增大呈先增大后减小的上凹型, 即随着法向应力的增大, 接触面的有效接触面积不断增大, 从而使得剪切刚度逐渐增大。但当法向应力超过一定限值后, 过大的法向应力不仅增大有效接触面积, 同时使试样内部微裂隙扩展、贯通而发生一定程度的破坏, 此时剪切刚度将减小。当法向应力继续增大后, 拟合曲面将会出现负值, 说明此时试样已经出现较大破坏而无法承担剪切变形。同一法向应力下, 剪切刚度随密度的变化幅度较平缓呈近似直线型, 随着密度从  $260\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  增大至  $600\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 剪切刚度增大程度较大; 但当密度从  $600\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  增大到  $750\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 剪切刚度增大程度显著减小, 表明密度较小时, 增大密度可以有效增大剪切刚度, 但超过一定限值后, 盲目增大泡沫混凝土密度并不能使剪切刚度继续增大, 因此应合理选择减震层材料的密度达到工程所需剪切刚度, 避免材料浪费并保证工程安全。

## 4 直剪试验数值模拟

### 4.1 数值模拟模型及参数

以试验结果类型 I 中密度为  $600\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  的泡沫混凝土-水泥砂浆试样为例, 研究接触面剪应力演化规律。模型由两部分组成, 上部为水泥砂浆, 尺寸为  $150\times 150\times 75\text{mm}$ , 下部为泡沫混凝土, 尺寸为  $150\times 150\times 75\text{mm}$ , 模型底部固定, 侧边界约束除剪切方向外其他水平方向位移, 模拟剪切盒对试样的作用, 模型顶部施加法向应力, 上部水泥砂浆右侧面施加剪切位移, 通过控制位移模拟剪切过程。固定初始及最大载荷步增量, 确保法向荷载及剪切位移在每个增量步中保持一致, 从而保证荷载及位移的均匀施加。泡沫混凝土采用可压缩泡沫模型, 水泥砂浆采用弹塑性模型, 同时由于接触面上复杂的应力-应变关系, 采用库伦摩擦模型与粘结模型联合构造的接触面模型。模型示意图如图 8 所示, 材料力学参数如表 3、表 4 所示。

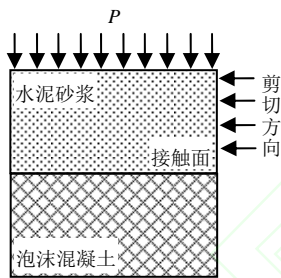


图 8 直剪试验数值模型示意图

Fig.8 Diagram of numerical model for direct shear test

表 3 衬砌(水泥砂浆)材料力学参数

Table 3 Mechanical parameters of cement mortar material

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	粘聚力 /MPa	摩擦角 /°	剪胀角 /°	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
水泥砂浆	6.0	0.29	2.0	35	35	2000

表 4 泡沫混凝土材料力学参数

Table 4 Mechanical parameters of foam concrete material

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服应力比	屈服静水应力比	单轴抗压强度 /MPa	密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
泡沫混凝土	0.54	0.14	0.33	0.05	4.0	600

### 4.2 试验与数值模拟结果对比分析

#### 4.2.1 剪应力-剪切位移曲线对比

数值模拟结果与试验的剪应力-剪切位移曲线

对比如图 9 所示。模拟结果的峰值强度略大于试验结果的峰值强度, 主要是试件内部的微裂隙导致材料强度弱化造成的。应力残余阶段试验结果中的剪应力由颗粒间的摩擦力及咬合力提供, 而模拟结果中接触面上剪应力仅为摩擦力提供, 因此试验结果的残余阶段剪应力稍大于模拟结果的剪应力。数值模拟曲线与试验曲线在峰前、峰后及残余变形阶段的变化规律基本吻合, 因此, 库伦模型与粘结模型联合构造的接触面模型可以较好的模拟泡沫混凝土-衬砌接触面的直剪试验结果。

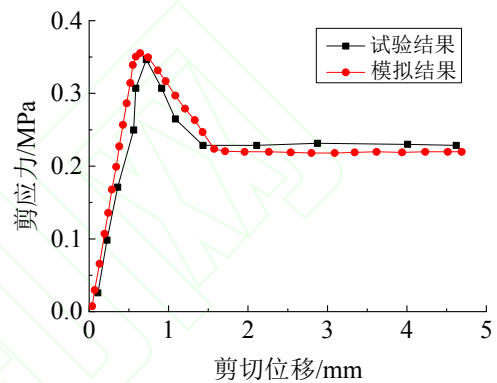


图 9 试验与模拟结果剪应力-剪切位移对比

Fig.9 The comparison of shear stress-shear displacement curves between test and simulation

#### 4.2.2 接触面剪应力演化规律

分析上述数值模拟结果可得到剪切过程中接触面上剪应力随剪切进程的分布及演化规律, 如图 10 所示。

剪切位移  $\delta=0.1\text{mm}$  时, 接触面从左至右依次分为弹性区-未变形区-弹性区, 此时在接触面两端 A、B 处剪应力较大, 且 A 端最大剪应力约为 B 端最大剪应力的 2 倍; 剪应力随接触面向内部延伸而逐渐减小, 如图 10(a)所示。

剪切位移  $\delta=0.2\text{mm}$  时, A、B 两端剪应力持续增大, 两端弹性区逐渐向内部发展, 加载端剪应力增值幅度较 B 端快, 同时在 A 端部分区域由于剪应力较大而产生塑性变形。此时接触面分为弹性区-未变形-弹性区-塑性区, 如图 10(b)所示。

剪切位移  $\delta=0.5\text{mm}$  时, A 端发生脱粘破坏, 此时接触面上该位置处仅为摩擦力; 塑性区及 A、B 两端弹性区继续沿接触面向内部扩展, 两端弹性区产生贯通, 接触面上无“未变形”区域, 此时接触面分为弹性区-塑性区-脱粘区, 如图 10(c)所示。

剪切位移  $\delta=2.0\text{mm}$  时, 接触面粘结强度完全损伤, 仅剩摩擦滑移。由于 A 点及 C 点处的棱边在压

力下易产生应力集中，因此两端的摩擦应力比内部摩擦应力稍大，如图 10(d)所示。

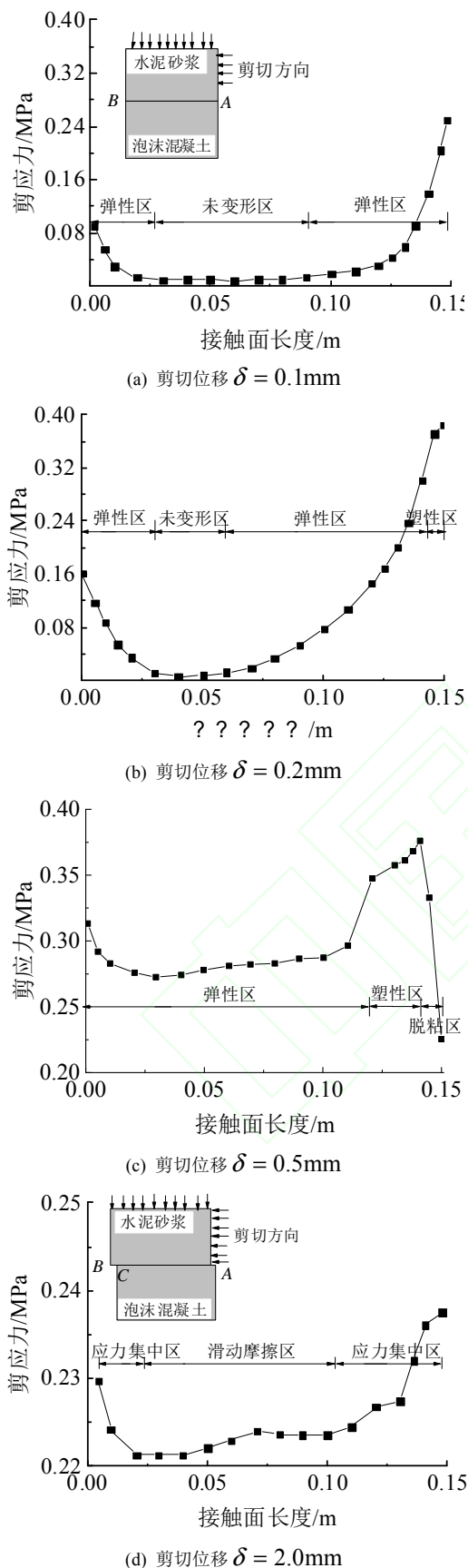


图 10 接触面剪应力分布及演化规律

Fig.10 The distribution and evolution law of shear stress in contact surface

### 5 接触面剪切破坏机理探讨

#### 5.1 剪应力-剪切位移本构关系

通过分析可知，泡沫混凝土-衬砌接触面的剪应力-剪切位移关系可归纳为图 11 所示形式。不同密度和法向应力组合下的剪切过程根据损伤演化可以总结为如图 11 所示的两种模式：OABD 和 OACD，分别对应类型 I 和类型 II、III。

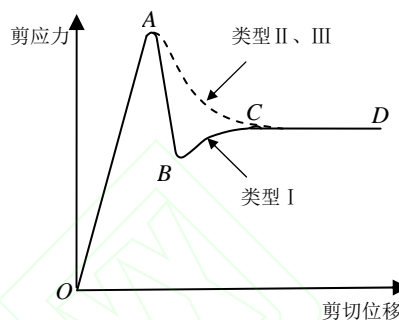


图 11 剪应力-剪切位移本构关系

Fig.11 Constitutive relation of shear stress-shear displacement

OABD (类型 I)：OA 段（弹性变形），剪切初始，剪应力随剪切位移线性增大，此阶段持续位移约为 0.5mm。AB 段（损伤演化）：随着剪切位移增大，接触面在弹性变形后逐渐开始损伤演化并产生塑性破坏。该阶段由于法向应力低、粘结性能好，塑性变形过程应力迅速跌落，持续位移较小；BD 段（摩擦滑动）：接触面剪切破坏后，界面粘结强度完全损伤，摩擦强度逐渐增大，并最终趋于稳定。

OACD (类型 II、III)：OA 段（弹性阶段），剪应力随剪切位移线性增大；AC 段（损伤演化）：该阶段由于法向应力较大，接触面破坏过程中颗粒间咬合力、摩擦力以及凹凸面间的爬坡效应仍能提供较大的抗剪力而不会突然产生较大的应力跌落，损伤持续位移较大；CD（摩擦滑动）：随着剪切进程的推进，接触面粘结强度完全丧失，界面抗剪力主要由摩擦力提供而达到稳定。

#### 5.2 剪应力-剪切位移本构模型

国内外学者对直剪试验中剪应力-位移( $\tau-\delta$ )本构关系进行了较多研究，提出以双曲线及指数模型为代表的多种理论模型，但从直剪试验的 $\tau-\delta$ 本构关系可知：类型 I 的 $\tau-\delta$ 曲线峰后应力迅速跌落，损伤演化过程持续位移较小，类型 II、III 则相反，损伤演化过程持续位移较大。传统双曲线或指数模型不能很好地表现本构关系的峰后损伤演化阶段，因此根据直剪试验结果及理论分析，提出如下泡沫混凝土-衬砌接触面 $\tau-\delta$ 复合指数本构模型：

$$\tau = (a\delta^m - b)\exp(-c\delta^n) + b \quad (1)$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $m$ 、 $n$ 均为拟合参数。

通过软件编制公式(1)，然后对图4所示试验结果进行拟合，试验结果及拟合结果如图12所示。

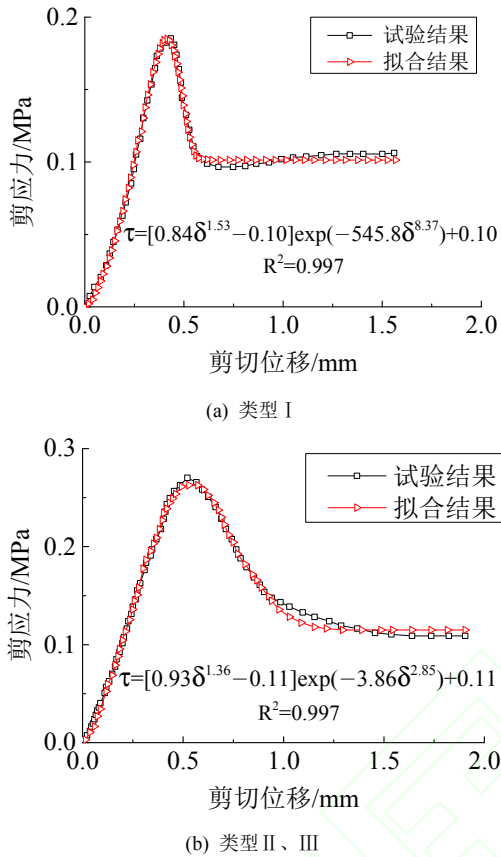


图12 试验结果与拟合结果比较

Fig.12 The comparison between test results and fitting results

由于接触面残余强度主要为破坏后的摩擦强度，考虑到尽量减少公式中的参数，将残余强度视为常数。与单纯的双曲线或者指数模型相比，参数相同的情况下，该复合指数本构模型拟合相关系数较高，说明该复合指数模型能够较好地模拟接触面加载至破坏的全过程

## 6 结论

通过泡沫混凝土-衬砌接触面的直剪试验及相应数值计算结果，从宏观角度研究分析接触面的变形及应力分布特性，并建立了剪应力-剪切位移关系的复合指数模型，可为隧道穿越断层带时的抗减震设计提供一定参考，主要结论如下：

(1)接触面在密度及法向应力耦合作用下将产生两种破坏形式：①接触面强度较低时，沿接触面破坏；②接触面强度高于泡沫混凝土时，泡沫混凝土被剪坏。

(2)泡沫混凝土试块内不同形态的裂纹表明接触面及试样内部剪应力分布具有空间不均匀性，距离加载面越近，裂纹发展越快。

(3)不同密度及法向应力下的剪应力-剪切位移曲线在峰值强度前的剪切刚度均较大，峰值强度后软化程度不同，因此可寻求一组合理的应力状态，减小峰后应力软化速率。

(4)峰值剪应力、残余剪应力及剪切刚度受泡沫混凝土密度与法向应力耦合作用呈现非线性，且对法向应力变化较为敏感。

(5)接触面剪应力分布及演化规律表明接触面上剪应力从两端同时向内部扩展，呈现渐进破坏特性，但两端剪应力扩展速率不同。

(6)根据接触接触面剪应力-剪切位移曲线规律，借鉴传统指数模型，提出了复合指数模型，能够反映接触面损伤演化的不同过程，更加符合实际情况。

由于泡沫混凝土制备时本身颗粒的不均匀性、孔隙分布的随机性，特别是水泥砂浆浇筑时与其接触状态无法达到完全相同，使得同一试验条件下试样的抗剪强度及破坏状态有一定离散性，未来仍需要进行大量试验深入研究减震层与衬砌在静、动态压剪与拉剪作用下的特性，为高烈度地震区隧道衬砌结构减震层设计提供理论及试验指导。

## 参考文献

- [1] 赵武胜, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 高性能泡沫混凝土隧道隔震材料研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1544—1552.  
ZHAO Wu-sheng, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. High-performance foam concrete for seismic-isolation materials of tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1544—1552.
- [2] 黄胜. 高烈度地震下隧道破坏机制及抗震研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.  
HUANG Sheng. Research on failure mechanism and aseismic measures for underground engineering under high intensity earthquake[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, 2010.
- [3] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面受载过程中的损伤[J]. 力学学报, 2004, 36(3): 322—327.  
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Load-induced damage of the interface between structure and coarse grained soil[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 36(3): 322—327.
- [4] 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 Jian-min. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005,



- 27(10): 1175—1179.
- [5] 张嘎, 张建民. 接触面弹塑性损伤模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水利发电学报, 2005, 24(4): 5—10.
- ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Application of elasto-plasticity damage interface model in stress-strain analysis of CFRD[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(4): 5—10.
- [6] 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 3D behavior of a gravel-structure interfaces[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(5): 169—175.
- [7] 徐泽友, 卢廷浩, 丁明武. 高塑性黏土与混凝土接触面剪切特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 71—74.
- XU Ze-you, LU Ting-hao, DING Ming-wu. Shear properties at interface between highly plastic clay and concrete[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2009, 37(1): 71—74.
- [8] 周国庆, 夏红春, 赵光思. 深部土-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 Guang-si. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(10): 1157—1162.
- [9] 刘博, 李海波, 刘亚群. 循环剪切荷载作用下岩石节理变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2475—2488.
- LIU Bo, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Experimental study of deformation behavior of rock joints under cyclic shear loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2475—2488.
- [10] 张茜, 邓辉, 李强, 等. 粗粒土大型剪切试验剪切带变形特性分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 30—36.
- ZHANG Qian, DENG Hui, LI Qiang, et al. Analysis of shear zone deformation behavior in coarse-grained soil by large scale direct shear test[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2015, 23(1): 30—36.
- [11] 曹平, 范祥, 蒲成志, 等. 节理剪切试验及其表面形貌特征变化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 480—485.
- CAO Ping, FAN Xiang, PU Cheng-zhi, et al. Shear test of joint and analysis of morphology characteristic evolution of joint surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 480—485.
- [12] 周文, 朱自强, 柳群义, 等. 复杂节理面剪切强度和变形特征的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1700—1704.
- ZHOU Wen, ZHU Zi-qiang, LIU Qun-yi, et al. Numerical analysis for shear strength and deformation characteristic of joint plane with complicated surface[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, 40(6): 1700—1704.
- [13] 王江莹, 曹文贵, 张超, 等. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1849—1856.
- WANG Jiang-ying, CAO Wen-gui, ZHANG Chao, et al. Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1849—1856.
- [14] 易成, 李志兵, 刘晋艳, 等. 两种介质接触面剪切力学性能的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1317—1323.
- YI Cheng, LI Zhi-bing, LIU Jin-yan, et al. Experimental study on shear mechanical behaviors of interface between two kinds of media[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1317—1323.
- [15] 郑立宁, 康景文, 谢强, 等. 含应变软化本构关系的岩土接触面直剪试验数值模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 613—618.
- ZHENG Lining, KANG Jing-wen, XIE Qiang, et al. Numerical simulation for direct shear tests with strain softening constitutive contact elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(S2): 613—618.
- [16] 易成, 王长军, 刘晋艳, 等. 两体接触面剪切力学行为的三维数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2149—2156.
- YI Cheng, WANG Chang-jun, LIU Jin-yan, et al. 3D numerical analysis of shear mechanical behavior for interface between interact ional bi-body[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2149—2156.
- [17] 李晓锋, 李海波, 夏祥, 等. 节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 583—591.
- Li Xiaofeng, Li Haibo, Xia Xiang, et al. Numerical simulation of mechanical characteristics of jointed rock in direct shear test [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 583—591.
- [18] M.Bahaaddini, G.Sharrook, B.K.Hebblewhite. Numerical direct shear tests to model the shear behavior of rock joints[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013(51): 101—115.
- [19] Junk-Wook Park, Jae-Joon Song. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009(46): 1315—1328.