

文章编号: 1001-4888(2020)06-0985-09

# 细小颗粒对道砟材料剪切性能影响的试验研究<sup>\*</sup>

李勇俊<sup>1</sup>, 严颖<sup>2</sup>, 赵春发<sup>3</sup>, 季顺迎<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116023; 2. 大连交通大学 土木工程学院, 辽宁大连 116028; 3. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川成都 610031)

**摘要:** 为研究细小颗粒贯入对铁路道砟材料剪切性能的影响规律, 采用大型直剪仪对煤粉和细沙两种典型细小颗粒材料影响下的道砟材料进行了直剪试验, 并得到了不同细小颗粒含量下道砟材料的剪切强度。试验结果表明: 道砟材料的剪切强度随法向载荷的增大而增大, 并随细颗粒含量的升高而减小; 剪切强度包络线呈非线性, 可采用通过原点的幂函数进行回归; 细颗粒含量和法向载荷的升高会导致道砟材料表观摩擦角的减小; 细小颗粒含量越高, 道砟材料的剪胀效应越不明显; 煤粉和细沙两种细小颗粒均会降低道砟材料的剪切性能, 但煤粉的影响更为显著。本文细小颗粒对道砟材料剪切性能的影响试验研究可为有砟铁路道床的运行维护提供依据。

**关键词:** 道砟材料; 直剪试验; 细小颗粒; 剪切性能

**中图分类号:** U213.7<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-19-087

## 0 引言

有砟道床由于其经济、排水速度快和维修方便等优点, 已成为铁路运输的主要承载结构。道床可以承受并传递列车载荷, 保持轨道平顺和稳定, 以及缓解和吸收轮轨的冲击和振动<sup>[1]</sup>。在有砟道床内部, 道砟颗粒之间存在显著的孔隙。随着轨道线路的长期运营, 煤粉和细沙等细小颗粒极易贯入道床内部并引起道床脏污, 其剪切强度和排水能力均会受到严重影响。在风沙区, 有砟轨道积沙现象非常普遍, 风沙流遇到道床的阻挡, 挟带的沙粒会埋没轨道和钢轨, 并贯入道床内部<sup>[2]</sup>。在主要用于煤炭运输的有砟轨道中, 列车往复载荷作用下道砟颗粒会发生破碎粉化、磨损和重组, 且运输过程中泄露的煤渣均会引起道床脏污<sup>[3]</sup>。细小颗粒的存在削弱了道砟颗粒间的互锁能力, 从而降低了道床的抗剪强度, 增加道床的塑性变形, 并可能造成道床的差异沉降, 最终降低轨道的稳定性<sup>[4]</sup>。为了得到有砟道床内部细小颗粒的沉积及附着对道床性能的影响, 国内外相继开展了大量的研究。

在道砟材料的数值模拟中, 为真实模拟道砟材料的力学行为, 基于非连续方法的离散单元法得到了迅速发展<sup>[5-7]</sup>。道砟颗粒可利用数个球形单元组合而成的黏结单元进行构造模拟, 并应用于受载荷作用时道砟的磨损及破碎模拟<sup>[8-10]</sup>。在模拟细小颗粒对道床剪切性能影响时, 可采用小粒径的球形单元模拟道床内的细小颗粒污染物, 并建立精细的道砟仿真单元<sup>[4, 11]</sup>, 也可通过减小道砟颗粒之间的接触摩擦角来模拟细小颗粒导致的润滑效应<sup>[12]</sup>。这两种方法均可对细小颗粒影响下道床材料剪切性能进行合理的数值模拟。此外, 多面体单元能合理描述道砟颗粒几何形态及颗粒间相互作用, 在铁路有砟道床的离散元模拟中已经得到了应用和发展<sup>[13-16]</sup>。

为研究细小颗粒影响下道砟材料的剪切性能, 目前开展了大量的试验测试<sup>[17]</sup>。对于道砟等大粒径

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-05-18; 修回日期: 2019-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572067, 11872136)资助

通信作者: 季顺迎(1972-), 男, 工学博士, 教授, 从事计算颗粒力学及工程应用研究。Email: jisy@dlut.edu.cn

颗粒,当道砟颗粒的粒径在 10~60mm 且在几何形态上呈现较高的不规则度时,道砟材料的内摩擦角可以超过  $50^{\circ}$ <sup>[18-20]</sup>。Indraratna 等和 Huang 等针对不同质量混合比的道砟材料与细小颗粒,采用直剪试验对不同细颗粒含量的道砟材料抗剪强度和剪胀进行了研究,结果表明随着道砟中细颗粒含量的提高,道砟材料的抗剪强度明显降低<sup>[21,22]</sup>,并对道砟材料的剪胀特性也会产生显著的影响<sup>[21]</sup>。Esmacili 等通过开展缩比例室内试验和道砟箱试验,对细颗粒污染的道床的沉降和道砟破碎进行研究,结果表明细颗粒含量的增加会加速道床的后期沉降速率,且道床的最终沉降和道砟破碎程度均会增大<sup>[23,24]</sup>。由此可见,细小颗粒贯入引起的道床脏污对道床力学行为和变形规律具有显著的影响。此外,含沙率对道砟材料弹性模量的影响也非常显著,且道砟材料的沉降量具有和弹性模量相似的变化规律<sup>[25]</sup>。目前,国内外开展了大量洁净道床剪切性能及剪胀特性的试验研究,但是对细小颗粒贯入后道床动力特性的研究还不充分。

针对上述问题,本文采用大型直剪仪并选取不同法向荷载值,对含有不同材质细小颗粒的道砟材料的剪切性能进行试验研究,从而确定细小颗粒影响下道砟材料剪切强度、最大剪胀位移和表观摩擦角等力学参数的变化规律。

## 1 道砟材料的直剪试验设计

在岩土工程中,直剪试验是一种有效测定土体剪切强度的方法。不同于小粒径岩土材料,道砟的尺寸大部分介于 20~60mm。由于道砟材料体现出极强的离散特性,往往需要采用大型的直剪试验设备。考虑道砟的大尺寸特点,需设计研发适用于道砟材料的多功能大型直剪试验仪对道砟材料的剪切特性进行试验测试。

### 1.1 直剪试验设备

图 1 为多功能大型直剪试验仪的结构示意图,其中法向作动器可以提供恒定的法向荷载,水平作动器用于对直剪仪下剪切盒施加水平拉力。法向位移计通过测定法向作动器压头位移得到剪切过程中道砟发生的剪胀位移,水平位移计可测定剪切过程中的水平位移。上盖板用于封闭上剪切盒,并将法向作动器提供的恒定载荷以均布力的形式传递至直剪箱内的道砟材料。底部的直线滑轨可以限制下剪切盒在竖直方向上的运动,并可减小下剪切盒在滑移过程中产生的摩擦力。

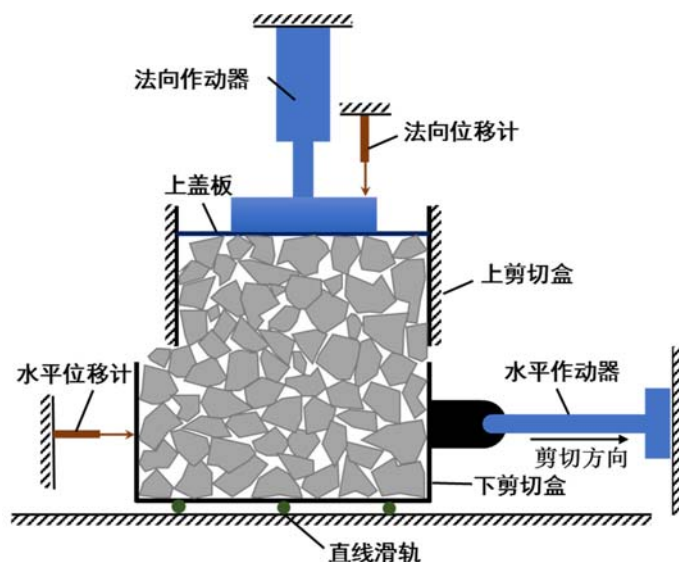


图 1 道砟材料直剪仪结构示意图

Fig. 1 The structure diagrammatic of direct shear apparatus for ballast materials

图 1 中上、下剪切盒的尺寸分别为  $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 200\text{mm}$  和  $500\text{mm} \times 400\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。下剪切盒在长度方向上比上剪切盒大 100mm,以保证剪切面的面积在剪切过程中始终保持不变。在对道砟材料进行直剪试验时,上剪切盒通过高强度螺栓固定在两侧的支撑钢架之间,剪切过程中通过水平作动

器对下剪切盒施加恒定的水平速度。上下剪切盒之间的间距可通过调缝螺栓进行控制,调节范围为 0~20mm。通过计算机两通道作动器静载控制系统实现对法向和水平作动器的精确控制,并同步监测和记录法向和水平作动器的加载力、法向和水平位移,从而实时对采集的数据进行存储和分析。本文道砟材料的现场直剪试验如图 2 所示。



图 2 道砟材料的直剪试验  
Fig. 2 The direct shear test of ballast materials

1.2 道砟材料的直剪试验方案

本文直剪试验所用道砟材料的岩性、质地等均符合特级道砟的材质要求,道砟密度为  $2545\text{kg/m}^3$ 。在道砟直剪试验之前,按照表 1 所示筛孔尺寸对道砟试样进行筛分,根据试验道砟级配选取各粒径范围的道砟并进行充分混合,得到的道砟直剪试样的级配符合特级道砟级配要求。

表 1 直剪试验中的道砟颗粒级配

Tab. 1 The ballast gradation in the direct shear experiment

| 筛孔尺寸/mm | 过筛质量百分比/% |        |
|---------|-----------|--------|
|         | 特级道砟级配范围  | 试验道砟级配 |
| 22.4    | 0~3       | 2      |
| 31.5    | 1~25      | 18     |
| 40      | 30~65     | 55     |
| 50      | 70~99     | 85     |
| 63      | 100       | 100    |

为研究不同细小颗粒材料对道床剪切性能的影响,分别选取煤粉和细沙两种典型的细颗粒材料,试验所用煤粉的密度为  $1500\text{kg/m}^3$ ,细沙密度为  $1650\text{kg/m}^3$ 。为使煤粉和细沙在道砟直剪试样中尽可能地均匀分布,在直剪箱内每铺设一层道砟便掺入一定质量的煤粉或细沙。通过在道砟直剪试样中掺入不同质量的煤粉或细沙以获得不同的细颗粒含量。

目前有多种评估指标可以对道床中细颗粒的含量进行描述。Selig 等提出通过指标 FI 对道床细颗粒含量进行统计,其更适用于评估粒径小于  $0.075\text{mm}$  的颗粒对道床产生的危害<sup>[26]</sup>。Feldman 等研究了道床孔隙中细小颗粒所占体积比例对道床排水性能的影响,提出了可直接测量细颗粒材料孔隙百分比的 PVC 方法<sup>[27]</sup>。Indraratna 等在 FI 和 PVC 方法的基础上,提出了相对道砟脏污率 VCI,用来衡量细颗粒与道砟颗粒的干重百分比<sup>[28]</sup>。以上细颗粒评估指标均有其适用性,需结合试验条件选择最合适的评估方法<sup>[11]</sup>。经过测量,本文试验所用的煤粉粒径均小于  $5\text{mm}$ ,细沙粒径均小于  $0.5\text{mm}$ ,均远小于道砟的尺寸。而 PVC 方法适用于粒径  $9.5\text{mm}$  以内的细小颗粒材料,因此本文采用 PVC 方法对道砟材料中细小颗粒的含量  $\alpha$  进行计算,即

$$\alpha = \frac{m_s/\rho_s}{V - (m_b/\rho_b)} \quad (1)$$

式中:  $m_s$  和  $\rho_s$  分别为细小颗粒材料的质量和密度;  $m_b$  和  $\rho_b$  分别为道砟的总质量和密度;  $V$  为上盖板底面以下部分的直剪盒体积。

在 3 个不同法向载荷(20kPa、50kPa、100kPa)作用下, 试验分别对洁净的道砟材料、加入煤粉的道砟材料( $\alpha$  分别为 20%、30% 和 40%) 和加入细沙的道砟材料( $\alpha$  分别为 20%、30% 和 40%) 进行直剪试验。在道砟材料的直剪试验中, 首先设计并安装直剪试验台, 固定位移计并安装压力传感器; 按照表 1 筛孔尺寸对道砟材料进行筛分, 根据试验道砟级配量取道砟并进行充分混合; 将混合后的道砟逐层放入直剪箱内并压实捣固, 且每铺设一层道砟即混合一定比例的煤粉或细沙材料; 铺设上盖板, 利用法向作动器对道砟材料进行进一步的压实, 本文试验统一采用从 0 逐渐加载到 10kN 的方式对道砟材料进行压实并卸载, 且压实过程仅进行一次加卸载; 法向作动器对上盖板施加恒定的载荷, 水平作动器以 0.033mm/s 的恒定速度拉动下剪切盒, 并实时记录法向和水平方向的力和位移; 当下剪切盒的水平剪切位移达到 100mm 时, 停止法向和水平作动器的加载, 试验结束。在试验过程中同步记录水平、竖直方向的位移和作用力, 以分析不同法向压力下道砟材料的剪切强度和体积变化。

## 2 道砟材料的直剪试验分析

### 2.1 细小颗粒对道床剪切强度的影响

为了降低试验过程中由于道砟破碎对试验结果产生的影响, 相同细颗粒含量  $\alpha$  的道砟材料在 3 种试验法向载荷作用下进行直剪试验后, 采用新的道砟材料对下一组进行试验。图 3 为道砟材料在法向载荷  $\sigma_n = 50\text{kPa}$  时不同细颗粒含量  $\alpha$  下得到的剪切应力—剪切应变曲线, 其中图 3(a) 为煤粉颗粒, 图 3(b) 为细沙颗粒。由图 3 可知, 当法向载荷一定时, 道砟材料的剪切强度  $\tau_f$  随细小颗粒含量  $\alpha$  的升高而不断下降。在不同  $\alpha$  下道砟材料的剪切应力—剪切应变曲线均具有明显的波动性, 但洁净道砟材料的波动性最大。在剪切应变达到 9% 后, 道砟材料的剪切应力基本在一个稳定的范围内波动。此外, 从图 3 中可以看出, 煤粉条件下道砟材料剪切强度各条曲线分布的相对较开, 但是细沙颗粒的各条曲线分布的相对较密, 这是因为煤粉在剪切过程中容易发生破碎并附着在道砟颗粒的表面, 从而减小道砟颗粒间的滑动摩擦系数, 且随着煤粉含量的增加, 其对道砟颗粒间摩擦系数的影响更加显著, 并进一步影响道砟材料的剪切强度; 而细沙干颗粒的强度较大, 不容易发生破碎, 也不易附着在道砟表面, 因此细沙材料对道砟材料剪切强度的影响小于煤粉。以上剪切过程中的波动性主要由道砟颗粒的错动重新排列和局部破碎引起<sup>[20]</sup>。

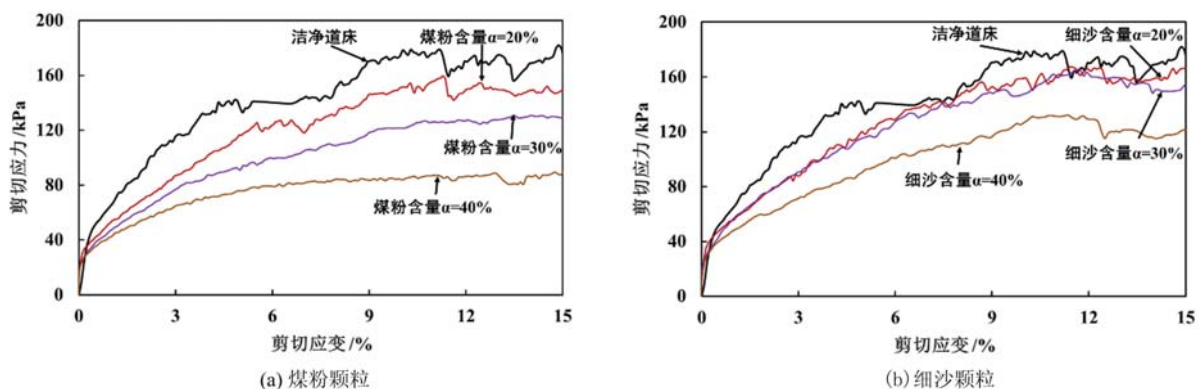


图 3 细小颗粒影响下道砟材料的直剪试验结果

Fig. 3 The direct shear test results of ballast materials under the influence of fine particles

田堪良等通过对堆石料的大型三轴剪切试验发现, 破坏面上的剪切应力随着法向应力的增加而呈非线性增加, 其增加幅度逐渐减小, 即强度包络线是非线性的, 因此利用传统的莫尔-库伦强度理论线性方程对剪切强度包络线进行描述是不精确的<sup>[29]</sup>。本文试验以直剪过程中最大剪切应力值作为煤粉和细沙在不同含量下道砟材料的抗剪强度, 根据非线性强度包络线, 利用幂函数对曲线进行回归, 将直剪试验得到的不同法向载荷、不同细颗粒含量下的道砟材料抗剪强度进行绘制, 如图 4 所示。图中实线为

洁净道砟材料的剪切强度包络线,图 4(a)中虚线为不同煤粉含量下的剪切强度包络线,图 4(b)中点虚线为不同细沙含量下的剪切强度包络线,所有的幂函数强度关系曲线均通过原点。

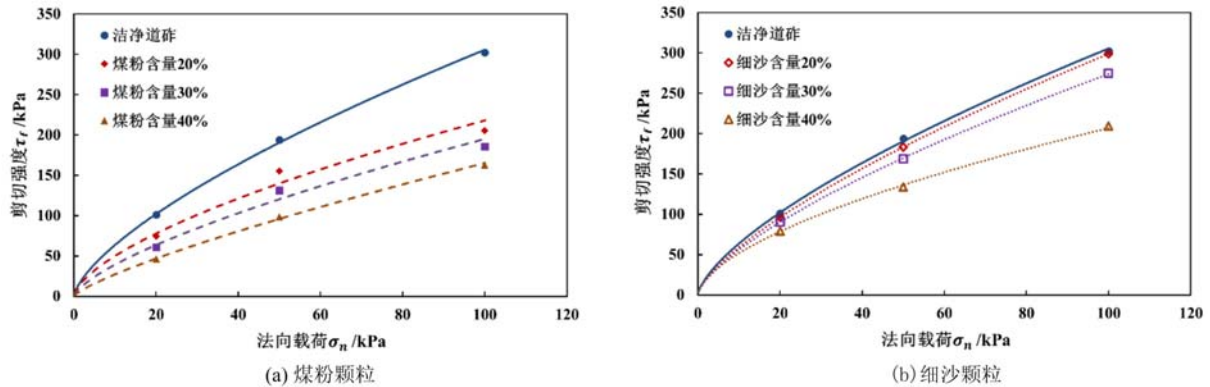


图 4 道砟材料的剪切强度及其对应的包络线

Fig. 4 The shear strength and corresponding envelop of ballast materials

由图 4 可见,在相同的细小颗粒含量下,道砟材料的抗剪强度均随着法向载荷的增加而增大。道砟材料中细颗粒含量的升高使得抗剪强度随法向载荷的增加幅值变小,煤粉和细沙均会削弱道砟材料的剪切性能。对比煤粉和细沙影响下道砟材料的剪切强度可知,煤粉颗粒对道砟材料剪切性能的影响要显著强于细沙颗粒。当法向载荷  $\sigma_n$  为 100kPa 时,洁净道砟材料的剪切强度为 302.5kPa,当煤粉含量达到 40%时道砟材料的剪切强度为 162.5kPa,而细沙含量 40%时的剪切强度则为 209.25kPa,其剪切强度比洁净道床分别降低了约 46.3%和 30.8%。

道砟材料的剪切强度包络线可用式(2)表示:

$$\tau_f = m\sigma_n^k \quad (2)$$

式中: $m$ 和 $k$ 为无量纲常数。在不同细颗粒含量 $\alpha$ 下的参数 $m$ 、 $k$ 及其决定系数 $R^2$ 列于表 2。系数 $R^2$ 可以说明试验得到的道砟材料剪切强度与法向载荷之间的相关密切程度。由表 2 可知, $R^2$ 值均高于 0.95,表明加入煤粉和细沙的道床剪切强度的幂函数回归效果较好。

表 2 道砟材料剪切强度包络线的系数  $m$ 、 $k$  及  $R^2$  值

Tab. 2 The values of parameter  $m$ ,  $k$  and  $R^2$  in the envelop curves for the shear strength of ballast materials

|       | $\alpha / \%$ | $m$   | $k$   | $R^2$ |
|-------|---------------|-------|-------|-------|
| 洁净道砟  | 0             | 13.24 | 0.682 | 0.999 |
|       | 20            | 11.45 | 0.640 | 0.969 |
| 含煤粉道砟 | 30            | 7.89  | 0.696 | 0.982 |
|       | 40            | 4.48  | 0.783 | 0.998 |
| 含细沙道砟 | 20            | 11.65 | 0.705 | 0.999 |
|       | 30            | 11.41 | 0.690 | 0.999 |
|       | 40            | 12.96 | 0.602 | 0.998 |

对于不同细小颗粒材料及其含量下道砟材料的剪切强度包络线,可通过有效应力莫尔圆的切线来获得其表观摩擦角 $\phi_p^{[30]}$ ,其中有效应力即为法向作动器施加的法向载荷大小。以洁净道砟的强度包络线为例,不同法向载荷下的有效应力莫尔圆及表观摩擦角如图 5 所示。根据图 5 所示求解表观摩擦角的方法,得到不同细小颗粒含量道砟材料在不同法向载荷作用下的表观摩擦角,并将其拟合曲线绘于图 6 中。由图 6 可知,对于分别混合了煤粉和细沙颗粒的道砟材料,随着颗粒含量和法向载荷的提高,其表观摩擦角均不断减小。此外,煤粉对道砟材料表观摩擦角的影响显著大于细沙。这是因为相比于细沙,煤粉颗粒在受道砟挤压作用时更容易发生破碎并附着在道砟颗粒的表面,从而降低了道砟颗粒间的摩擦作用。

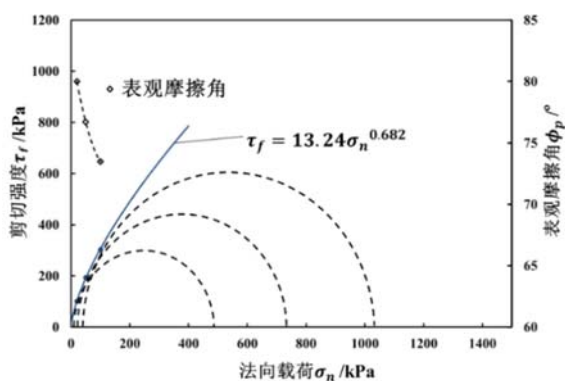


图 5 强度包络线对应的莫尔圆及表观摩擦角

Fig. 5 Mohr circle and apparent friction angle of strength envelop

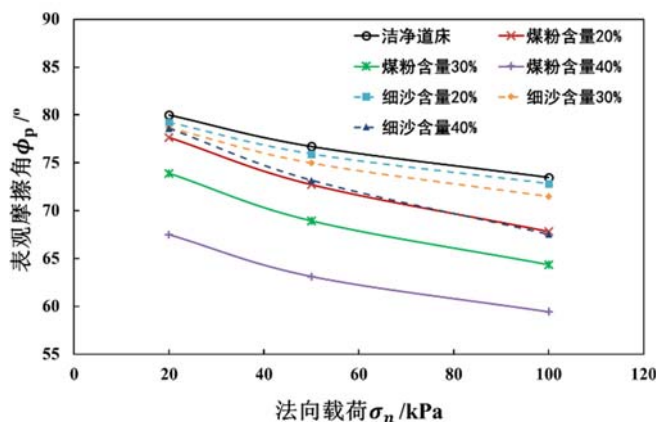


图 6 细小颗粒影响下道砟材料的表观摩擦角

Fig. 6 Apparent friction angle of ballast materials under the influence of fine particles

## 2.2 细小颗粒对道砟材料剪胀特性的影响

图 7 为道砟材料在法向载荷  $\sigma_n = 50\text{kPa}$ 、不同细颗粒含量  $\alpha$  下得到的法向位移—剪切应变曲线。当法向位移为负时,表示道砟材料发生了剪缩;法向位移为正时,则表示道砟材料发生了剪胀。在直剪初期,不同细颗粒含量的道砟材料均发生了剪缩现象;与细沙颗粒相比,含煤粉颗粒的道砟材料由剪缩转变为剪胀所对应的剪切应变更大,这时由于煤粉的强度较低,在直剪过程中含煤粉的道砟材料内部孔隙更容易在加载过程中被挤压而产生更大的体积压缩;随着剪切的进行,道砟材料在剪切应变达到 15% 时的法向位移均大于 0。这说明在  $\sigma_n = 50\text{kPa}$  的法向载荷作用下,道砟材料呈现出明显的剪胀特点。

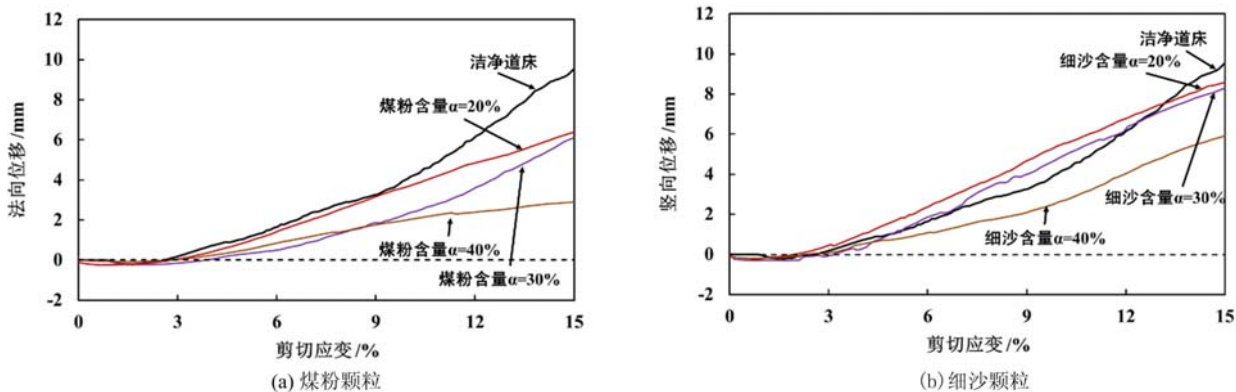


图 7 50kPa 法向载荷作用下道砟材料的法向位移—剪切应变曲线

Fig. 7 Vertical displacement-shear strain curves of ballast aggregates under the vertical load of 50kPa

以剪切应变达到 15% 时的法向位移作为道砟材料的最大剪胀位移,对 3 种不同法向载荷下得到的

道砟材料最大剪胀位移进行统计,如图8所示。由图8可知,法向载荷越小,最终的剪胀位移越大。煤粉和细沙对道砟材料剪胀位移的影响类似,得到的最大剪胀位移均随着细颗粒含量的增大而减小,但煤粉对道砟材料剪胀特性的影响更加显著。当法向载荷  $\sigma_n = 50 \text{ kPa}$  时,洁净道床在剪切应变达到 15% 时的剪胀位移为 9.55 mm,煤粉含量 40% 时的剪胀位移为 2.9 mm,相同含量的细沙则为 5.98 mm。在道砟材料中加入煤粉或细沙,均减小了道砟颗粒间的摩擦系数,起到润滑的作用,从而降低了道砟材料在直剪过程中的膨胀趋势。

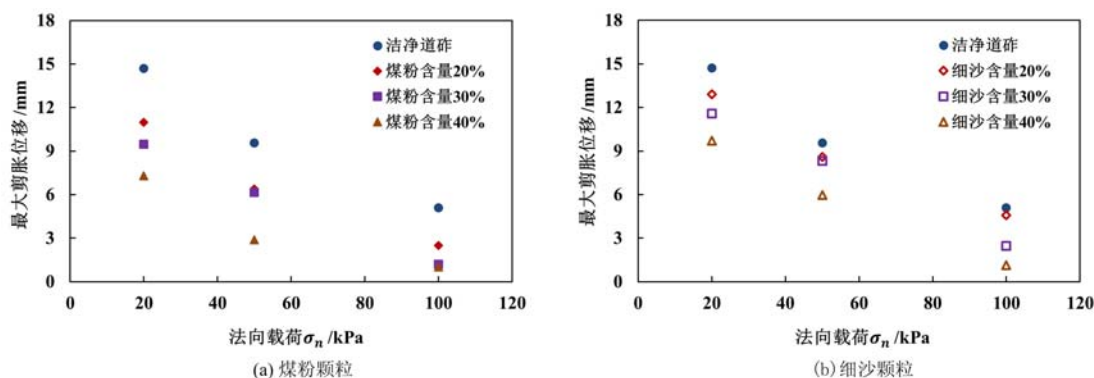


图8 细小颗粒影响下道砟材料的最大剪胀位移

Fig. 8 The maximum shear dilatation of ballast materials under influences of fine particles

### 3 结论

本文采用大型直剪仪在不同法向载荷作用下分别对洁净和混合不同细小颗粒的道砟材料剪切性能进行了试验研究。试验结果表明,对于洁净和加入细小颗粒的道砟材料,法向载荷的增加均会增大道砟材料的抗剪强度。在不同法向载荷作用下,不同细小颗粒含量道砟材料的抗剪强度包络线可由通过原点的非线性幂函数进行拟合;法向载荷和细颗粒含量的提高均会导致道砟材料的表观摩擦角减小,煤粉相比于细沙对道砟材料的表观摩擦角的影响更加显著;随着法向载荷的增大,道砟材料在剪切应变达到 15% 时的最大剪胀位移变小。煤粉和细沙在道砟材料中含量的提高均会削弱道床的剪胀趋势,但煤粉对道床剪胀的影响更大。

### 参考文献:

- [1] 谷爱军. 铁路轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010 (GU Aijun. Railway track[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010 (in Chinese))
- [2] 钱征宇. 中国沙漠铁路的风沙危害及其防治技术[J]. 中国铁路, 2003(10):24—26 (QIAN Zhengyu. The wind-sand damage and its prevention and control technology for Chinese desert railway[J]. Chinese Railway, 2003(10): 24—26 (in Chinese))
- [3] Indraratna B, Vinod J S, Lackenby J. Influence of particle breakage on the resilient modulus of railway ballast[J]. Geotechnique, 2009, 59(7):643—646.
- [4] Indraratna B, Nimbalkar S, Coop M, et al. A constitutive model for coal-fouled ballast capturing the effects of particle degradation [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61:96—107.
- [5] McDowell G R, Lim W L, Collop A C, et al. Comparison of ballast index tests for railway track beds[J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2004, 157(3):151—161.
- [6] 姜卫利, 范俊杰. 散粒体道床离散单元法分析[J]. 铁道学报, 2001(4):98—101 (JIANG Weili, FAN Junjie. Using of distinct element method to analyse granular ballast bed[J]. Journal of the China Railway Society, 2001 (4):98—101 (in Chinese))
- [7] 肖宏, 高亮, 侯博文. 铁路道床振动特性的三维离散元分析[J]. 铁道工程学报, 2009(9):14—17 (XIAO Hong, GAO Liang, HOU Bowen. Analysis of ballast dynamic behaviour with three-dimensional discrete element method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(9):14—17 (in Chinese))

- [8] Indraratna B, Ngo N T, Rujikiatkamjorn C, et al. Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: discrete element simulation [J]. *International Journal of Geotechnics*, 2014, 14(1):34–44.
- [9] Houssain Z, Indraratna B, Darve F, et al. DEM analysis of angular ballast breakage under cyclic loading [J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2007, 2(3):175–181.
- [10] Lobo-Guerrero S, Vallejo L E. Discrete element method analysis of railtrack ballast degradation during cyclic loading [J]. *Granular Matter*, 2006, 8(3-4):195–204.
- [11] 徐旻, 高亮, 井国庆, 等. 脏污对道床剪切性能影响及评估指标的离散元分析[J]. *工程力学*, 2015(8):96–102 (XU Yang, GAO Liang, JING Guoqing, et al. Shear behaviour analysis of fouled railroad ballast by DEM and its evaluation index [J]. *Engineering Mechanics*, 2015(8):96–102 (in Chinese))
- [12] Huang H, Tutumluer E. Discrete Element Modeling for fouled railroad ballast [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(8):3306–3312.
- [13] Eliás J. Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles [J]. *Powder Technology*, 2014, 264: 458–465.
- [14] 孙珊珊, 严颖, 赵春发, 等. 往复荷载下铁路道砟沉降特性的扩展多面体离散元分析[J]. *铁道学报*, 2015(11): 89–95 (SUN Shanshan, YAN Ying, ZHAO Chunfa, et al. Dilated polyhedral discrete element analysis of settlement characteristics of railway ballast under cyclic loading [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015 (11):89–95 (in Chinese))
- [15] 边学成, 李伟, 李公羽, 等. 基于颗粒真实几何形状的铁路道砟剪切过程三维离散元分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(5):64–75 (BIAN Xuecheng, LI Wei, LI Gongyu, et al. Three-dimensional discrete element analysis of railway ballast's shear process based on particles' real geometry [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5):64–75 (in Chinese))
- [16] 邵文杰, 练松良, 杨新文. 碎石道床沉降的离散元分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017(2):41–48, 68 (SHAO Wenjie, LIAN Songliang, YANG Xinwen. Analysis of railway ballast settlement with discrete element method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017(2):41–48, 68 (in Chinese))
- [17] 高亮, 徐旻, 殷浩. 脏污材质对散体道床剪切力学性能影响的试验研究[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(1):1–6 (GAO Liang, XU Yang, YIN Hao. Experiment research of shear behavior of railway ballast influenced by different fouling materials[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(1):1–6 (in Chinese))
- [18] Aursudkij B, McDowell G R, Collop A C. Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility [J]. *Granular Matter*, 2009, 11(6):391–401.
- [19] Indraratna B, Tennakoon N, Nimbalkar S S, et al. Behaviour of clay fouled ballast under drained triaxial testing [J]. *Geotechnique*, 2012, 63(5):410–419.
- [20] 王鹏程, 刘建坤, 李旭, 等. 直剪条件下碎石材料力学特性研究[J]. *铁道学报*, 2014(2):103–108 (WANG Pengcheng, LIU Jiankun, LI Xu, et al. Mechanical behavior of crushed stone aggregate subjected to direct shear conditions [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014(2):103–108 (in Chinese))
- [21] Indraratna B, Ngo N T, Rujikiatkamjorn C. Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(3):313–322.
- [22] Huang H, Tutumluer E, Dombrow W. Laboratory characterization of fouled railroad ballast behavior [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2117(12):93–101.
- [23] Esmaeili M, Zakeri J A, Mosayebi S A. Effect of sand-fouled ballast on train-induced vibration [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014, 15(7):635–644.
- [24] Esmaeili M, Aela P, Hosseini A. Experimental assessment of cyclic behavior of sand-fouled ballast mixed with tire derived aggregates [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 98:1–11.
- [25] 季顺迎, 苏勇, 严颖. 含沙铁路道砟弹性模量和沉降量的试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2011, 8(2):47–52 (JI Shunying, SU Yong, YAN Ying. Experimental studies of elastic modulus and settlement of railway ballasts with sand [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2011, 8(2):47–52 (in Chinese))
- [26] Selig E T, Waters J M. *Track geotechnology and substructure management* [M]. Thomas Telford, 1994.
- [27] Ebrahimi A, Tinjum J M, Edil T B. Deformational behavior of fouled railway ballast [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 52(3):1–12.

- [28] Indraratna B, Su L J, Rujikiatkamjorn C. A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(2):322—326.
- [29] 田堪良, 张慧莉, 骆亚生. 堆石料的剪切强度与应力—应变特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 24(4):657—661 (TIAN Kanliang, ZHANG Huili, LUO Yasheng. Shear strength and stress-strain properties of rockfill materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 24(4):657—661 (in Chinese))
- [30] Indraratna B, Ionescu D, Christie H D. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(5):439—449.

## Experimental investigation on shear mechanical properties of ballast materials under influence of fine particles

LI Yongjun<sup>1</sup>, YAN Ying<sup>2</sup>, ZHAO Chunfa<sup>3</sup>, JI Shunying<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China; 3. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics of the shear behaviors of ballast materials filled with fine particles, a large direct shear apparatus is used to measure the shear mechanical properties of ballast materials filled with pulverized coal and fine sand, respectively. Under different vertical loads, the influence of fine particle materials with different contents on the shear properties of ballast materials are compared with the clean ballast materials. The test results show that the shear strength of ballast aggregates increases with the increase of vertical load, and decreases with the increase of fine particle content. Moreover, the envelope of shear strength of ballast materials behaves nonlinear, which can be regressed by the power function passing through the coordinate origin. The increases of fine particle contents and vertical loads result in the decrease of apparent friction angle of ballast materials. Compared with the clean ballast materials, the increase of fine particle content is negative to the ballast dilatation. Both the coal and sand particles can reduce the shear strengths of ballast materials, while the coal particles has more significant influence. The influence regularity of fine particles on the shear mechanical properties of ballast bed provides reference in the maintenance of ballasted track of railway.

**Keywords:** ballast materials; direct shear test; fine particles; shear property