

# 土工格栅加强下有砟铁路道床动力特性的离散元-有限元耦合分析<sup>\*</sup>

邵 帅<sup>1</sup> 严 颖<sup>2</sup> 季顺迎<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室,大连,116023)(<sup>2</sup>大连交通大学土木与安全工程学院,大连,116028)

**摘 要** 论文提出了一种可用于分析土工格栅与道砟颗粒间相互作用的离散元-有限元耦合方法. 道砟颗粒采用镶嵌单元模拟,土工格栅采用梁单元计算,并在接触面上实现了离散元和有限元域间力学参数的传递. 通过循环载荷作用下的计算,对比分析了土工格栅对道砟颗粒的加固性能. 通过加筋后道砟颗粒的直剪试验进一步揭示了土工格栅加固作用的内在机理. 结果表明:土工格栅可有效地降低有砟道床横向位移以及顶部沉降量,加筋后道砟材料的内聚力和摩擦角都有所提高. 由此可见,土工格栅能够增加道砟颗粒间的自锁作用,提高道砟材料的强度,并有效地阻止剪切带从上部道砟箱向下部道砟箱贯穿.

**关键词** 铁路道砟,土工格栅,直剪试验,离散元-有限元耦合方法

## 0 引言

有砟道床是一种典型的离散颗粒物质,其具有良好的弹性、快速排水能力、建设成本低廉、易于更换以及便于维修等优点,被广泛应用于铁路工程中<sup>[1,2]</sup>. 然而随着铁路工程技术的发展,列车运行的高速化和重载化已成为一种必然趋势. 这对有砟道床的承载能力提出了越来越高的要求<sup>[3,4]</sup>. 在高速重载条件下,有砟道床更容易发生不均匀沉降,甚至使道砟颗粒发生破碎、粉化,严重影响着列车运行安全<sup>[5]</sup>.

采用土工格栅加筋有砟道床是解决有砟道床不均匀沉降的一种有效方法,并已逐步应用于铁路工程中<sup>[6,7]</sup>. 研究表明:土工格栅能够有效地增加道砟颗粒间的自锁作用,进而减小整体道床的横向滑移,提高整体道床的稳定性. 此外,由于道床的永久沉降主要来自于道砟颗粒的重新排列和相对错动<sup>[8]</sup>. 而土工格栅能够很大程度上维持道床构架的稳定,提高整体道床的强度,因此有砟道床的沉降量在采用土工格栅加筋后也会有明显的降低<sup>[9]</sup>.

在岩土工程中,直剪试验是用来测试岩土材料物理力学性质的常用方法,并可用于土工格栅对岩

土材料加固性能的试验研究<sup>[10-12]</sup>. 以往通常对小粒径的岩土材料进行直剪试验研究. 然而,道砟是一种特殊的岩土材料,具有很大的颗粒粒径,它的平均粒径为 40 mm,最大粒径可达到 60 mm. 因此,为分析道砟材料在土工格栅加筋后的力学行为,需要进一步开展针对道砟材料的试验研究<sup>[13-15]</sup>. 采用镶嵌单元模型可研究直剪作用下道砟颗粒间的自锁作用. 通过数值试验发现对有砟道床施加横向约束可以有效地降低道床的沉降量,并提高轨枕的稳定性<sup>[16,17]</sup>. 通过改进的试验机可测试大尺度下加筋后道砟材料在循环载荷作用下的力学行为,结果表明:土工格栅能够有效控制有砟道床的横向位移,降低道床的永久竖向沉降量,并减少道砟的破碎率<sup>[18]</sup>.

针对有砟道床中道砟材料和土工格栅分别具有非连续和连续的结构性质,发展离散元-有限元耦合模型是能解决连续体和非连续体相互作用问题的有效途径之一. 离散元和有限元方法是工程中常用的分析离散体和连续体力学行为的方法<sup>[19,20]</sup>. 为充分发挥这两种方法在分析连续体和非连续体问题中的优势,离散元-有限元耦合法越来越受到学者们的重视<sup>[21-23]</sup>. 尤其对于有砟道床,需要同时考虑离散的道砟颗粒和其它连续的结构间的相互作用. 离散元-有限元耦合模型可用来研究在拉拔作用下埋在颗粒

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(U1234209 和 11572067)资助.

2016-03-03 收到第 1 稿,2016-06-28 收到修改稿.

<sup>\*\*</sup> 通讯作者. Tel:13332286972, E-mail:jisy@dlut.edu.cn

材料中土工格栅的力学行为,并进一步分析土工格栅与其周围土颗粒间的相互作用<sup>[24]</sup>。

本文提出了一种可用于分析土工格栅与道砟颗粒间相互作用的离散元-有限元耦合方法。道砟颗粒采用镶嵌单元模拟,土工格栅采用梁单元计算,并在接触面上实现了离散元和有限元域间的力学参数的传递。采用此耦合模型模拟了加筋与未加筋时道砟在直剪作用下的力学行为。通过剪切力-位移、剪切强度、位移矢量以及名义体积应变分析了加筋后道砟材料强度变化。此外,通过对比加筋与未加筋有砟道床的力学行为,研究了土工格栅对有砟道床的加固性能。

## 1 土工格栅加筋有砟道床的数值模型

针对加筋道砟中各构件的不同结构性质,分别对道砟颗粒以及土工格栅进行数值建模。道砟颗粒具有几何形状不规则的结构特点,采用镶嵌单元对道砟颗粒进行构造。土工格栅具有细长的肋条,这里采用圆截面梁单元近似模拟。为模拟道砟颗粒与土工格栅的相互作用,建立离散元-有限元耦合模型,实现离散元和有限元间力学参数的传递。

### 1.1 道砟颗粒的离散元模型

#### (1) 非规则道砟颗粒的构造

道砟是典型的散体材料,具有几何形状不规则的结构特点<sup>[25]</sup>。道砟颗粒的几何形状对整体有砟道床的力学行为有很大影响,能够很大程度地提高道砟颗粒间的自锁作用<sup>[26,27]</sup>。为此,本文采用镶嵌式单元近似模拟不规则道砟颗粒的几何形状,采用离散元法分析有砟道床的力学行为。

首先根据道砟石子的形状,采用三角形拼接出道砟石子的封闭边界。随后向此边界包围的空间中填充等粒径的球形颗粒,并使之不断膨胀。受边界的约束作用,球形颗粒间的重叠量不断增加,整体形状逐渐趋近道砟石子形状。镶嵌单元的生成过程如图1所示。由于镶嵌单元中颗粒间的重叠量过大,因此无法计算单元内部的接触力。镶嵌单元无法破碎,在运动过程中被视为刚体。此外,向封闭边界中填充的颗粒越多,颗粒间的重叠量越大,对道砟石子的形状模拟的越好。出于计算效率的考虑,本文采用大约十个球形颗粒构造一个镶嵌单元。采用此方法构造出不同形状的道砟颗粒如图2所示。通过有限段方法可以计算出镶嵌单元的质量、质心以及转动惯量<sup>[28]</sup>。

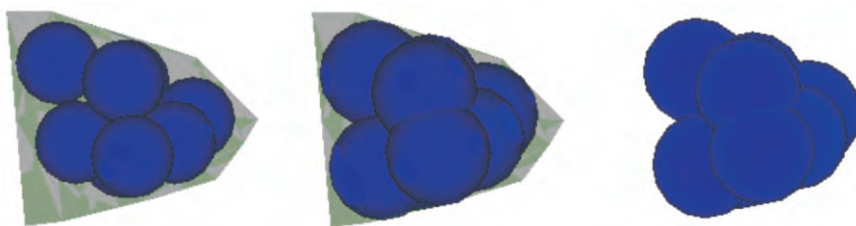
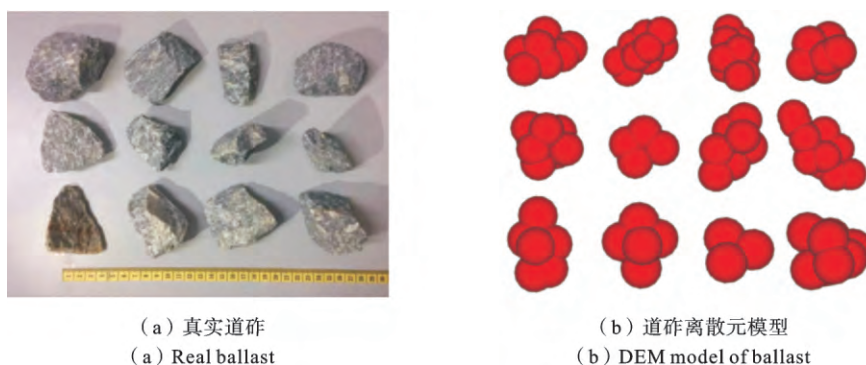


图1 道砟边界内球形颗粒的生长过程

Fig. 1 The growth process of spheres inside the generated ballast surfaces



(a) 真实道砟  
(a) Real ballast

(b) 道砟离散元模型  
(b) DEM model of ballast

图2 真实的道砟和生成的不同形状道砟模型

Fig. 2 Real ballast and generated different ballast particles with DEM

## (2) 颗粒间的接触力模型

镶嵌单元间的接触实际上是两个相邻圆球颗粒的接触. 通过统计镶嵌单元内所有球形单元与其周围颗粒的合力并依据牛顿第二定律, 计算镶嵌单元的运动以及旋转. 根据赫兹理论, 颗粒间的法相接触力为:

$$F_n = K_n \chi_n^{3/2} - \frac{3}{2} A K_n \chi_n^{3/2} \chi_n^* \quad (1)$$

式中  $\chi_n$  和  $\chi_n^*$  分别为法向方向上两颗粒间的相对位移以及相对速度;  $K_n$  为道砟颗粒间的法向刚度,  $A$  为道砟材料的粘滞参数.

根据摩尔库伦摩擦定律, 颗粒间的切向接触力为<sup>[29]</sup>:

$$F_s^* = K_s \chi_s^{1/2} \chi_s \quad (2)$$

$$F_s = \min[F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu F_n] \quad (3)$$

式中,  $\chi_s$  为两颗粒间的剪切位移;  $\mu$  为摩擦系数;  $K_s$  为颗粒间的切向刚度.  $K_n$  和  $K_s$  可写作<sup>[30]</sup>:

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (4)$$

$$K_s = 8G^* \sqrt{R^*} \quad (5)$$

其中  $E^* = E/[2(1-\nu^2)]$ ,  $G^* = G/[2(2-\nu)]$ ,  $G =$

$E/[2(1-\nu)]$ ,  $R^* = R_A R_E / (R_A + R_E)$ .  $E$ 、 $\nu$  和  $G$  分别为杨氏模量、泊松比以及剪切模量;  $R_A$  和  $R_E$  分别为两个相互接触颗粒的半径.

离散元时间步的最大值定义为:

$$t_{\max} = \frac{\pi R_{\min}}{0.163\nu - 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (6)$$

在实际的计算过程中, 时间步的取值不允许超过上述最大值. 根据经验公式, 时间步的取值为

$$\Delta t = a t_{\max} \quad (7)$$

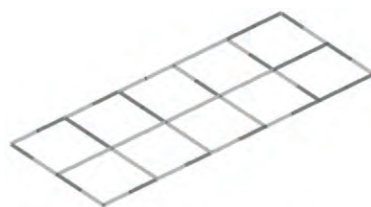
通常当配位数大于 4 时,  $\Delta t = 0.2 t_{\max}$ , 当配位数小于 4 时,  $\Delta t = 0.4 t_{\max}$ . 本文  $a$  取 0.2.

## 1.2 土工格栅的有限元模型

由于土工格栅的独特的结构性质, 这里采用 6 自由度 2 节点梁单元对土工格栅进行模拟, 采用线弹性模型进行计算. 由于离散元的时间步长通常远小于有限元的时间步长, 采用中央差分法计算土工格栅的动力特性. 土工格栅的有限元模型如图 3 所示. 土工格栅网孔尺寸为 40 mm × 40 mm, 格栅网格的截面半径为 3 mm. 土工格栅的计算参数列于表 1 中.



(a) 土工格栅  
(a) Geogrid type



(b) 土工格栅有限元模型  
(b) FEM model of geogrid

图 3 土工格栅及其有限元模型

Fig. 3 The geogrid type and its FEM model

表 1 土工格栅有限元计算参数

Table 1 Computation parameters of FEM of geogrid

| 参数                                    | 数值                    |
|---------------------------------------|-----------------------|
| 单元截面积 ( $\text{m}^2$ )                | $2.83 \times 10^{-5}$ |
| 惯性矩 ( $\text{mm}^4$ )                 | $1.02 \times 10^{-9}$ |
| 转动惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) | $2 \times 10^{-9}$    |
| 杨氏模量 (GPa)                            | 200                   |
| 剪切模量 (GPa)                            | 80                    |

## 1.3 离散元-有限元耦合模型

在建立土工格栅与道砟颗粒相互作用的离散

元-有限元耦合模型过程中, 离散元与有限元间的力学参数传递是需要解决的关键问题. 为此, 本文提出了球形单元与 2 节点梁单元的耦合接触算法.

在  $t_k$  时刻, 首先计算离散元在外载荷作用下的动力响应, 此时有限元网格固定不动, 并将有限元单元的外表面作为离散元的位移边界条件. 随后根据离散单元与边界的重叠量可以计算出离散元-有限元耦合接触力. 然而, 由于离散单元排列的随机性, 所得到的耦合接触力通常并不位于有限元的节点上. 此时根据式(8)计算出耦合接触力在有限元节点上的等效节点力, 并根据等效节点力计算出有限元区域的位移响应.

$$\begin{cases} R_i^A = -\left(\frac{P_i b^2}{L^3}\right)(3a-b) \\ R_i^B = -\left(\frac{P_i a^2}{L^3}\right)(3a-b) \end{cases} \quad (i=1 \sim 3) \quad (8)$$

式中  $P_i$  为耦合接触力在三个坐标轴上的分力,  $a$  和  $b$  为接触点至节点  $A$  和  $B$  的距离,  $L$  为梁单元的长度,  $R_i^A$  和  $R_i^B$  分别为梁单元的等效节点力。

在  $t_{k+1}$  时刻, 根据上一时间步求得的有限元位移响应更新离散元的位移边界条件, 并重复上述计算过程, 完成离散元和有限元之间的耦合。球形颗粒与 2 节点梁单元的接触算法示意图如图 4 所示。

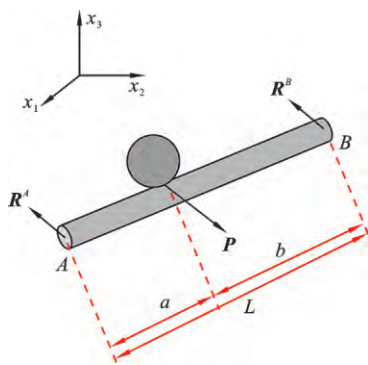


图 4 离散元和有限元耦合算法示意图

Fig. 4 Sketch of contact algorithm between DEM and FEM

本文的离散元-有限元耦合模型采用 Fortran 语言编制, 其核心内容为离散元和有限元间力学参数传递部分, 即离散元向有限元域传递力边界条件, 有限元向离散元返回位移边界条件。在每个时间步内, 离散元计算过程中土工格栅有限元域的位置固定, 并将之作为离散元的位移边界条件处理。由此计算离散元与有限元域的耦合接触力, 并依此计算有限元域的变形。随后根据有限元域的变形更新离散元中土工格栅的位置以及变形, 并应用于下一时间步离散元的计算中。离散元-有限元耦合的计算分析流程如图 5 所示。

## 2 道砟直剪试验及结果分析

为分析土工格栅对道砟材料的加固性能, 建立了加筋与未加筋道砟颗粒直剪试验的数值模型。通

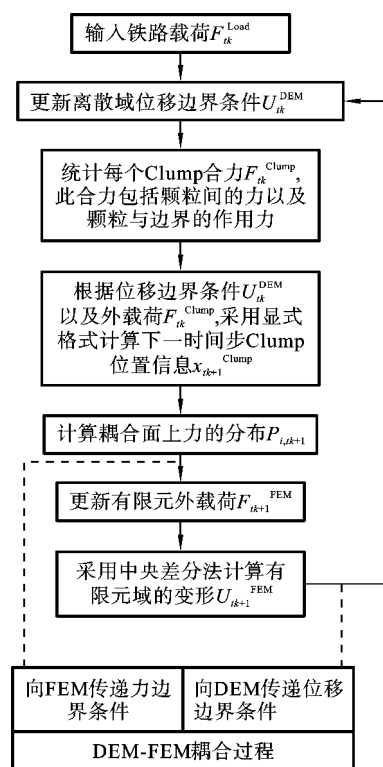


图 5 DEM-FEM 耦合程序流程图

Fig. 5 Flow chart of coupled DEM-FEM procedure

过剪应力-位移、剪切强度、位移矢量以及名义体积应变分析了土工格栅对道砟材料的加固作用。

### 2.1 道砟直剪数值模型

为了研究土工格栅与道砟颗粒间的相互作用, 揭示土工格栅加固有砟道床的内在机理, 本文建立了道砟颗粒的直剪试验数值模型, 通过对比加筋与未加筋道砟颗粒的力学行为, 分析影响道砟加固性能的主要因素。道砟直剪试验模型如图 6 所示, 模型的长度为 0.45 m, 宽度为 0.23 m, 高度为 0.45 m, 剪切面距地面的距离为 0.25 m。模型总共包括 747 个镶嵌单元, 4398 个球形颗粒。道砟颗粒的尺寸分布为 21 mm 至 63 mm, 平均尺寸为 40 mm, 道砟的级配分布曲线如图 7 所示<sup>[31]</sup>。在道砟顶部施加竖向载荷, 载荷的取值范围分别为 1000 kN-10000 kN 以及 10000 kN-100000 kN。通过控制上部道砟箱的位移完成直剪试验, 剪切速率为 6.4 mm/s。道砟材料的离散元计算参数列于表 2 中。



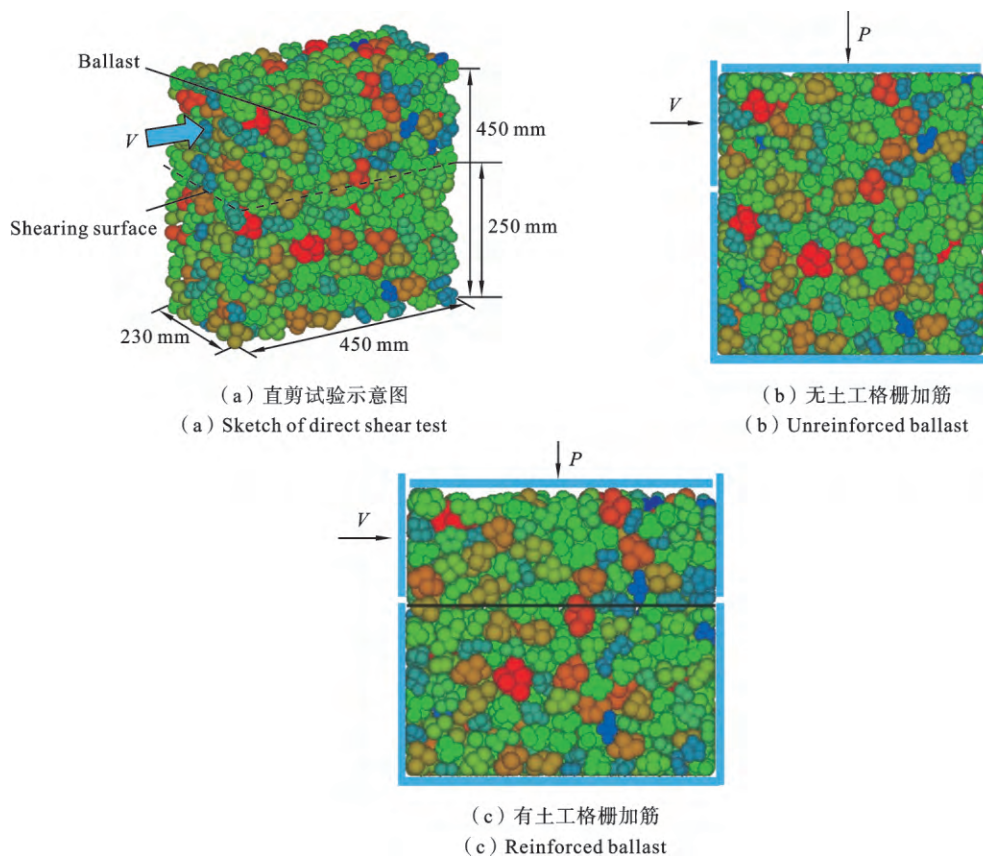


图6 道砟直剪试验

Fig. 6 Direct shear test of ballast particle

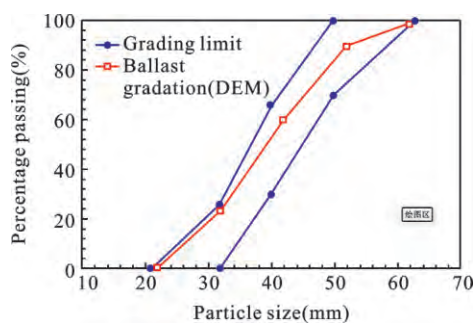


图7 道砟级配曲线

Fig. 7 Ballast grading curve

表2 道砟材料的离散元计算参数

Table 2 Computation parameters of DEM of ballast

| 参数                             | 数值              | 参数                          | 数值                |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| 道砟密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 2545            | 道砟弹性模量(GPa)                 | 5                 |
| 摩擦系数                           | 0.3-0.9         | 泊松比                         | 0.22              |
| 法向刚度( $\text{N}/\text{m}$ )    | $3 \times 10^7$ | 剪切刚度( $\text{N}/\text{m}$ ) | $2.6 \times 10^6$ |
| 平均粒径(m)                        | 0.04            | 宽度(m)                       | 0.23              |
| 高度(m)                          | 0.45            | 长度(m)                       | 0.45              |
| 颗粒数目                           | 4398            | 镶嵌单元数目                      | 747               |

## 2.2 直剪试验数值结果及分析

### (1) 剪切力-位移分析

加筋与未加筋道砟直剪试验的剪切应力-位移曲线如图8所示. 施加的竖向应力取值范围为100-900 kPa. 两组试验中均可以观测到明显的应变软化现象. 随着竖向应力的增加剪切应力也不断增加. 在加载的初始阶段, 剪切应力与位移的关系呈现线性性质, 然而采用土工格栅加筋后剪切应力-位移曲线的斜率相比未加筋时有明显提高, 表明土工格栅能够明显提高道砟材料的杨氏模量. 这是由于土工格栅相对于道砟材料抗变形能力更强, 使土工格栅周围的道砟颗粒的运动受到限制, 加筋后道砟材料的杨氏模量明显提高. 此外, 土工格栅加筋能够提高道砟的最大剪切应力, 这里以竖向应力为100 kPa的情况为例, 在未加筋时道砟材料的最大剪切应力为178 kPa, 而加筋后最大剪切应力提升至234 kPa.

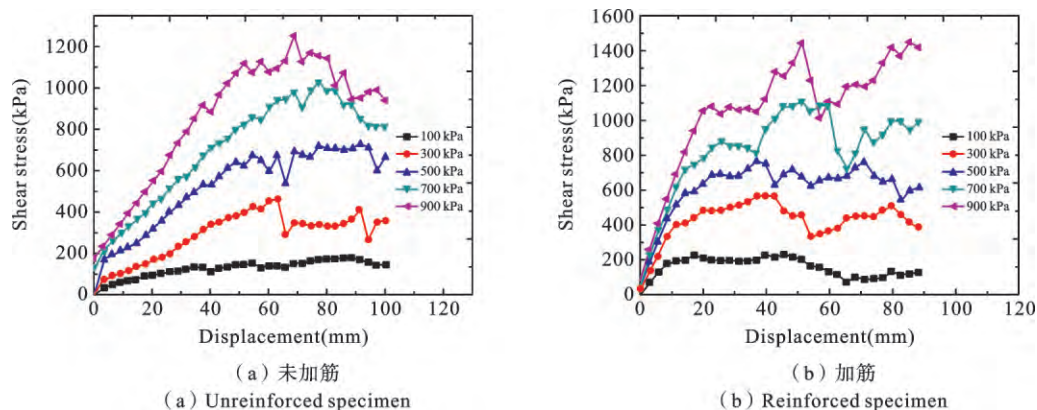


图8 剪应力-位移曲线

Fig. 8 The shear stress-displacement curve

Qian 等通过三轴试验研究了加筋与未加筋条件下道砟材料剪切强度的变化. 发现应力-应变曲线在较高轴向应变时会发生明显的跳跃现象. 此外, 加筋后道砟材料应力应变曲线明显高于未加筋时的结果<sup>[7]</sup>. 与本文得到的结果相吻合.

#### (2) 剪切强度分析

加筋与未加筋道砟的剪切强度如图9所示. 可以发现道砟剪切强度随着竖向应力的增加而线性增加. 根据所得到的数据拟合出道砟材料的 Mohr-

coulomb 屈服面, 从拟合曲线中可以得到道砟材料的内聚力  $c$  以及摩擦角  $\phi$ . 未加筋与加筋道砟材料的摩尔库伦包络线如式(9)和(10)所示.

$$\tau = 1.465\sigma_n - 34.468 \quad (9)$$

$$\tau = 1.537\sigma_n - 118.237 \quad (10)$$

式中, 未加筋条件下道砟内聚力为 34.47 kPa, 摩擦角为 55.7°. 加筋后道砟材料的内聚力为 118.24 kPa, 摩擦角为 57.0°.

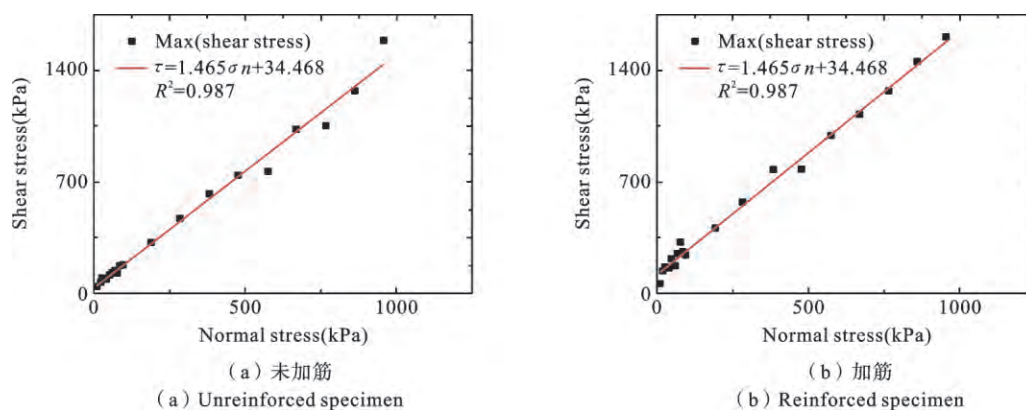


图9 加筋与未加筋道砟材料的剪切强度

Fig. 9 Shear strength of reinforced and unreinforced specimen

为直观地观测土工格栅对道砟材料强度的影响, 将不同法向应力下加筋与未加筋的道砟强度绘于图10中. 可以发现, 在采用土工格栅加筋之后, 道砟材料的强度有明显的提高, 其中内聚力由 34.47 kPa 提升至 118.24 kPa, 摩擦角由 55.7° 略微提升至 57.0°.

道砟虽然具有很强的离散特性, 但在宏观角度

上道砟仍是一种特殊岩土材料, 具有岩土材料普遍的力学性质, 其剪切强度于大多岩土材料一样, 服从摩尔库伦屈服准则.

Wang 等<sup>[32]</sup>采用离散元法通过直剪试验研究了土的剪切强度, 发现土的剪切强度很好地符合线性规律. Chen 等<sup>[33]</sup>采用三轴试验研究了土工格栅对粗粒土强度的影响. 随着土工格栅的数量的增加粗

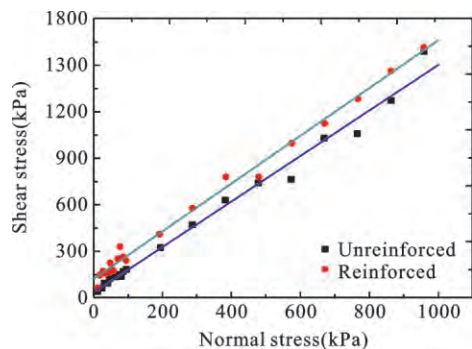


图 10 加筋与未加筋道砟材料的摩尔库伦包络线

Fig. 10 Mohr-Coulomb failure envelopes of reinforced and unreinforced specimen

粒土的剪切强度也不断增加,而摩擦角的变化并不明显.

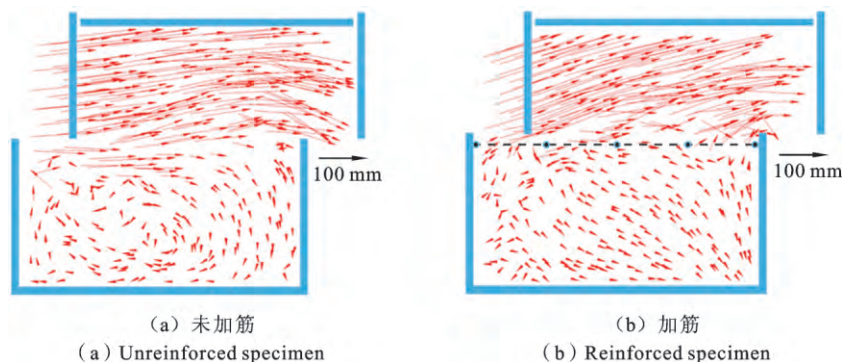


图 11 加筋与未加筋时道砟颗粒的位移矢量图

Fig. 11 Particle displacements of reinforced and unreinforced ballast

Salazar 等<sup>[34]</sup>通过离散元法对粗颗粒进行了直剪试验研究.通过位移矢量图发现在试验初始阶段颗粒间并未发生明显地错动.当发生大应变时,主动箱中颗粒速度高于从动箱中的颗粒,并在剪切面上

形成剪切带.与本文的研究结果相吻合.

#### (4) 名义体积应变

由于道砟材料的离散性质,基于连续介质的应变度量并不准确.为此,本文通过名义体积应变衡量

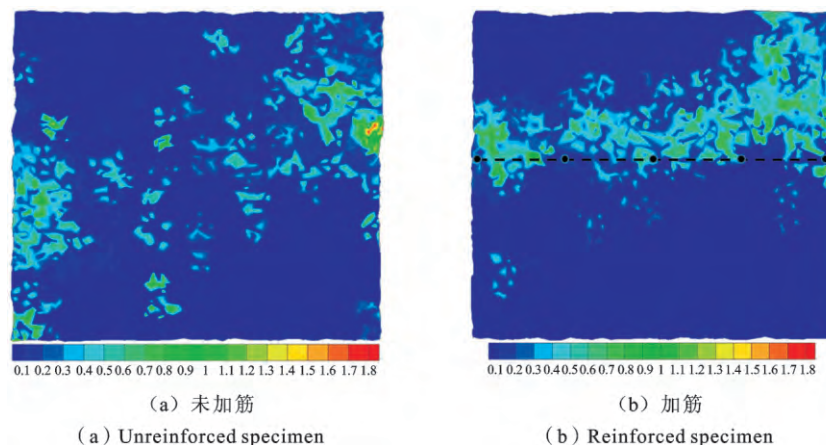


图 12 名义体积应变

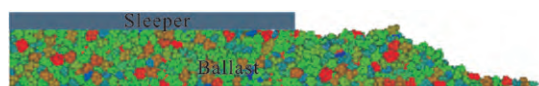
Fig. 12 Nominal volumetric strain



道砟颗粒与其相邻颗粒的相对位置变化关系<sup>[35]</sup>. 剪切位移为 30 mm 时加筋与未加筋道砟材料的应变云图如图 12 所示. 可以看到, 未加筋时道砟箱内部应变较小, 只有局部发生了一些颗粒的错动. 随着上箱向右侧的移动, 在剪切面上位于上箱和下箱中的道砟颗粒受到剪切作用彼此分离, 导致位于剪出口处的道砟颗粒错动较大, 产生较大的应变. 表明, 在剪切位移为 30 mm 时, 道砟箱的剪切作用并没有破坏其内部道砟的相邻关系, 直剪箱上箱的剪切运动通过剪切面上道砟颗粒的摩擦和自锁作用从上部道砟传递至下部道砟, 道砟呈现出整体运动的特征. 然而在采用土工格栅加筋后, 位于剪切面上的道砟颗粒受土工格栅的水平约束作用无法自由移动, 从而阻断了位移从上部道砟向下部道砟传递. 在土工格栅上方形成了明显的剪切带, 从而保证了底部道砟的稳定.

### 3 土工格栅对有砟道床加固作用的 DEM-FEM 耦合分析

有砟道床以及采用土工格栅加筋后的有砟道床



(a) 无土工格栅加筋  
(a) Unreinforced ballast track



(b) 有土工格栅加筋  
(b) Reinforced ballast track

图 13 有砟道床结构的离散元模型

Fig. 13 DEM model of ballast bed

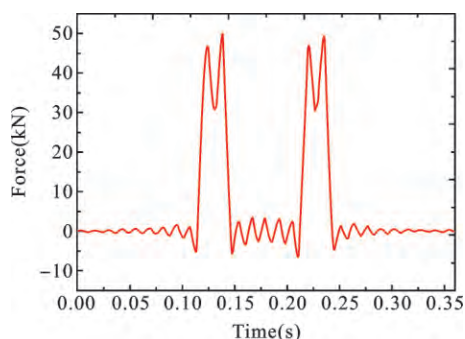


图 14 施加的铁路载荷

Fig. 14 The applied railway load

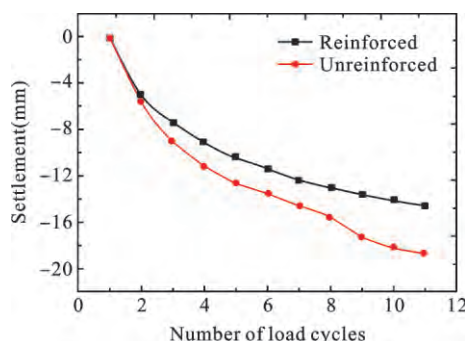


图 15 道床顶部沉降

Fig. 15 The settlement of ballast bed

铁路载荷作用下有砟道床顶部的沉降量如图 15 所示. 在加载初期, 加筋与未加筋的道床均有明显的沉降. 这主要是因为有砟道床的初始模型中有

的数值模型如图 13 所示. 首先将道砟颗粒约束于铁路道床横截面范围内. 考虑铁路道床的路肩表面为自由表面, 将铁路道床横截面右侧边界去除, 并使道砟颗粒在 1 kN 的法向力作用下自由运动, 直到整体有砟道床稳定为止. 此外, 考虑有砟道床横截面的对称性, 同时为了提高计算效率, 这里对有砟道床右半边部分进行数值建模. 在模型的底部边界施加竖向位移约束, 模型的左侧边界施加横向位移约束, 模型右侧为自由表面. 模型中枕木被视为刚体, 用来传递来自上部的铁路载荷. 为了对比加筋与未加筋铁路道床力学行为的区别, 有砟道床以及加筋后的有砟道床均在相同的工况下进行分析. 其中, 铁路载荷如图 14 所示<sup>[36]</sup>. 根据中国高速列车运行条件, 本文取轴重为 10 t, 时速为 250 km/h. 由于对称性, 模型只考虑道床右半部分, 因此轴重取 5 t, 即 50 kN. 根据列车车厢长度和时速确定出一个载荷周期为 0.36 s, 频率为 2.78 Hz. 轨道类型为中型的有砟道床轨枕下道床面砟厚度为 200-300 mm, 本文取模型初始高度为 0.3 m. 土工格栅距底部距离为 0.17 m. 计算规模为 1728 个镶嵌单元, 10098 个球形颗粒.

较多的孔隙. 加载后期, 道砟顶部的沉降量趋于平稳. 在采用土工格栅加筋后, 道床顶部沉降明显低于未使用格栅加筋的工况. 土工格栅对道砟材料的加



固效果显著. 此外, 由于道床右侧为自由边界, 道床在载荷作用下会向右侧轻微滑动, 这也是道床产生沉降的主要原因之一. 为了研究土工格栅对道床的横向约束作用, 这里将 1728 个道砟颗粒的横向滑移量进行统计平均, 其结果如图 16 所示. 可以看出在加载过程中, 道床整体的横向滑移量不断减少, 并逐渐趋于稳定. 在土工格栅加筋后, 道床的横向滑移量明显减小, 在第 5 次循环加载后整体道床不再发生明显的横向位移. 表明土工格栅能够大幅提高道砟颗粒间的自锁作用, 从而对维持整体道床的稳定性起到关键的作用. 加筋后道床水平侧向位移的减小也验证了直剪试验中土工格栅对道砟材料强度的影响, 通过对土工格栅周围颗粒运动的限制能够有效地提高道砟材料的强度, 对整体道床的稳定起到有益的作用.

Hussaini 等研究了循环载荷作用下加筋有砟道床的力学行为. 发现采用土工格栅加筋后有砟道床的沉降明显降低. 加筋时道床的沉降比未加筋时降低至少 50%<sup>[18]</sup>. Chen 等建立了循环载荷作用下加筋与未加筋条件下道砟道床的离散元模型. 研究发现采用土工格栅可以很好的限制力链向道床两侧

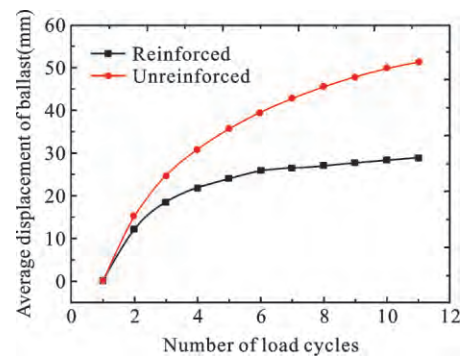


图 16 道床平均侧向位移

Fig. 16 The average lateral displacement of ballast bed

发散, 这也解释了本文中采用土工格栅加筋后道床侧向位移减少的原因<sup>[37]</sup>.

加筋与未加筋有砟道床的沉降量-应力曲线如图 17 所示. 由于单个铁路载荷曲线中具有两次类似冲击加载过程, 并在载荷峰值处有一次卸载. 有砟道床的沉降量-应力曲线也表现出相应的规律. 随着循环载荷次数的增加, 加筋与未加筋有砟道床沉降量逐渐变小, 单次循环载荷加卸载曲线所包围的面积也逐渐减少.

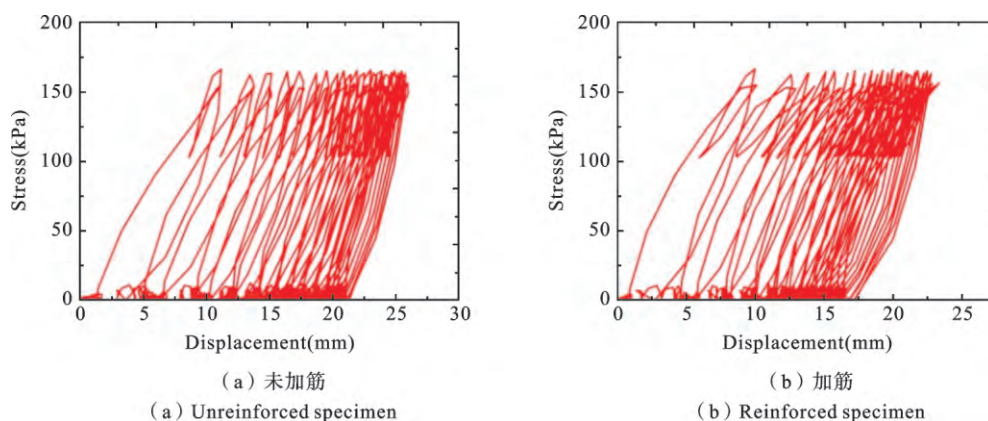


图 17 加筋与未加筋有砟道床沉降量-应力曲线

Fig. 17 Settlement-stress curve of reinforced and unreinforced ballast bed

为直观地对比加筋与未加筋有砟道床沉降量-应力曲线的区别, 将图 17 中第一次循环和第十次循环绘于图 18 中. 在第一次循环中当外部载荷全部卸载后, 有砟道床沉降显著, 表明整体道床发生了明显的塑性变形. 这主要是因为加载初期疏松的道砟颗粒容易发生相互错动并重新排列. 随着道砟颗粒不断密实, 加载后期道床的塑性变形逐渐减小, 逐渐表

现出非线性弹性的材料性质. 此外, 加筋后有砟道床的杨氏模量略微提高.

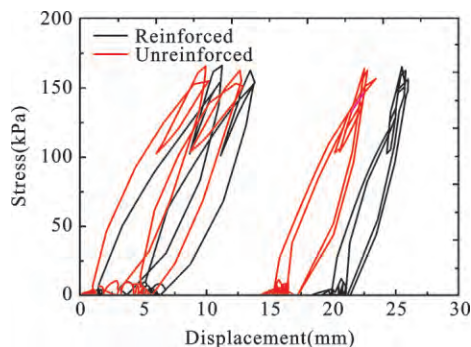


图 18 加筋与未加筋有砟道床第一次和第十次加卸载曲线

Fig. 18 The 1st and 10th loading and unloading curve of reinforced and unreinforced ballast bed

#### 4 结语

本文提出了球形单元与梁单元的耦合方法,将道砟颗粒采用离散元模拟,土工格栅采用有限元计算.通过对比加筋与未加筋道砟材料的直剪试验揭示了土工格栅加固道砟材料的内在机理.此外,通过耦合模型进一步分析了土工格栅对有砟道床的加固性能.计算结果表明,加筋后道砟材料的杨氏模量明显上升,且加筋与未加筋的道砟材料均满足 Mohr-Coulomb 屈服准则;采用土工格栅加筋后,道砟材料的内聚力和摩擦角都有所提高;土工格栅能有效地阻止剪切带由道砟箱上部向下部贯穿,提高道砟颗粒的稳定性.此外,采用土工格栅加筋后可以明显降低有砟道床的沉降量,道床的整体横向位移也有明显降低.

#### 参考文献

- [1] El Kacimi A, Woodward P K, Laghrouche O, et al. Time domain 3D finite element modelling of train-induced vibration at high speed [J]. Computers & Structures, 2013, 118(6): 66-73.
- [2] 庞玲,赵才友,姚力,王平.道砟垫隔振性能理论与试验研究[J].铁道工程学报, 2014, (3): 56-60. (Pang L, Zhao C Y, Yao L, Wang P. Experiments and research on the vibration isolation performance of ballast mat[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, (3): 56-60. (in Chinese))
- [3] 高建敏,翟婉明.铁路有砟轨道下沉破坏研究进展[J].铁道学报, 2008, 30(5): 97-104. (Gao J M, Zhai W M. Advance in track settlement destruction of ballast railway track[J]. Journal of The China Railway Society, 2008, 30(5): 97-104. (in Chinese))
- [4] 高建敏,翟婉明,徐涌.铁路有砟轨道下沉及高低不平顺发展预测研究[J].中国铁道科学, 2009, (6): 132-134. (Gao J M, Zhai W M, Xu Y. Study on the settlement of railway ballasted track and the growth forecast of track vertical profile irregularity [J]. China Railway Science, 2009, (6): 132-134. (in Chinese))
- [5] 徐畅,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 Y, Gao L, Jing G Q, Cai X P, Luo Q. Shear behavior analysis of fouled railroad ballast by DEM and its evaluation index [J]. Engineering Mechanics, 2015, (8): 96-102. (in Chinese))
- [6] Leshchinsky B, Ling H I. Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2013, 36(1): 33-43.
- [7] Qian Y, Mishra D, Tutumluer E, et al. Characterization of geogrid reinforced ballast behavior at different levels of degradation through triaxial shear strength test and discrete element modeling [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(5): 393-402.
- [8] 高亮,范俊杰,刘秀波.散体道床流变力学特性的研究[J].铁道学报, 2001, (1): 85-89. (Gao L, Fan J J, Liu X B. Research on rheologic mechanics characteristics of crushed stone ballast [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, (1): 85-89. (in Chinese))
- [9] Brown S F, Kwan J, Thom N H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(6): 326-335.
- [10] Cabalar A F, Dulundu K, Tuncay K. Strength of various sands in triaxial and cyclic direct shear tests [J]. Engineering Geology, 2013, 156(2): 92-102.
- [11] Esmaili D, Hatami K, Miller G A. Influence of matric suction on geotextile reinforcement-marginal soil interface strength [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2014, 42(2): 139-153.
- [12] Kang Y, Nam B H, Zornberg J G, et al. Pullout resistance of geogrid reinforcement with in-plane drainage capacity in cohesive soil [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2014, 19(3): 602-610.
- [13] Indraratna B, Nimbalkar S, Christie D, et al. Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 907-917.

- [14] Palmeira E M, Gomes R C, Fernandes G. Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track[J]. *Geosynthetics International*, 2008, 15(5): 311-321.
- [15] 严颖, 季顺迎. 碎石料直剪实验的组合颗粒单元数值模拟[J]. *应用力学学报*, 2009, 26(1): 1-7. (Yan Y, Ji S Y. Numerical simulation of direct shear test for rubbles with clumped particles[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2009, 26(1): 1-7. (in Chinese))
- [16] Wang Z, Jing G, Yu Q, et al. Analysis of ballast direct shear tests by discrete element method under different normal stress[J]. *Measurement*, 2015, 63: 17-24.
- [17] 赵春发, 张徐, 翟婉明. 高速铁路碎石道砟振动的离散元模拟[J]. *计算力学学报*, 2015, (5): 674-680. (Zhao C F, Zhang X, Zhai W M. A discrete element simulation of high-speed railway ballast vibration[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, (5): 674-680. (in Chinese))
- [18] Hussaini S K K, Indraratna B, Vinod J S. Performance assessment of geogrid-reinforced railroad ballast during cyclic loading[J]. *Transportation Geotechnics*, 2015, 2: 99-107.
- [19] 周爱军, 栗冰. CFG 桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6): 1803-1808. (Zhou A J, Li B. Experimental study and finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1803-1808. (in Chinese))
- [20] 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 H, Gao L, Hou B W. Analysis of ballast dynamic behavior with three-dimensional discrete element method[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009, (9): 14-17. (in Chinese))
- [21] Guo L, Xiang J, Latham J, et al. A numerical investigation of mesh sensitivity for a new three-dimensional fracture model within the combined finite-discrete element method[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, 151: 70-91.
- [22] Indraratna B, Ngo N T, Rujikiatkamjorn C, et al. Coupled discrete element-finite difference method for analysing the load-deformation behaviour of a single stone column in soft soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 63: 267-278.
- [23] Onate E, Rojek J. Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2004, 193(27-29): 3087-3128.
- [24] Tran V D H, Meguid M A, Chouinard L E. A finite-discrete element framework for the 3D modeling of geogrid-soil interaction under pullout loading conditions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 37: 1-9.
- [25] 徐旻, 高亮, 杨国涛, 等. 道砟颗粒的精细化建模及对道床力学性能影响[J]. *铁道学报*, 2014, (9): 73-78. (Xu Y, Gao L, Yang G T, Luo Q. Fine modelling of ballast grains and influence on mechanical properties of track bed[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2014, (9): 73-78. (in Chinese))
- [26] 高亮, 罗奇, 徐旻, 等. 基于离散元法的铁路道床力学特性[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(7): 1064-1069. (Gao L, Luo Q, Xu Y, Ma C S. Railway ballast bed mechanical property based on discrete element method[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(7): 1064-1069. (in Chinese))
- [27] 严颖, 季顺迎. 颗粒形态对离散介质剪切强度的影响[J]. *岩土力学*, 2009, 30(S1): 225-230. (Yan Y, Ji S Y. Effects of particle shape on shear strength of discrete media[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(S1): 225-230. (in Chinese))
- [28] Yan Y, Ji S. Discrete element modeling of direct shear tests for a granular material[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2009, 34(9): 978-990.
- [29] Ramírez R, Pöschel T, Brilliantov N V, et al. Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres[J]. *Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics*, 1999, 60(4 Pt B): 4465-72.
- [30] Renzo A D, Maio F P D. An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(5): 1303-1312.
- [31] Chen C, McDowell G R, Thom N H. Investigating geogrid-reinforced ballast: Experimental pull-out tests and discrete element modeling[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(1): 1-11.
- [32] Wang Z, Jacobs F, Ziegler M. Visualization of load transfer behaviour between geogrid and sand using PFC<sup>2D</sup>[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(2): 83-90.
- [33] Chen X, Zhang J, Li Z. Shear behaviour of a geogrid-reinforced coarse-grained soil based on large-scale tri-

- axial tests[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(4): 312-328.
- [34] Salazar A, Saez E, Pardo G. Modeling the direct shear test of a coarse sand using the 3D Discrete Element Method with a rolling friction model[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 67: 83-93.
- [35] 楚锡华, 李锡夔. 离散颗粒多尺度分级模型与破碎模拟[J]. *大连理工大学学报*, 2006, 46(3): 319-326. (Chu X H, Li X K. Hierarchical multi-scale discrete particle model and crushing simulation[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(3): 319-326. (in Chinese))
- [36] Paolucci R, Maffei A, Scandella L, et al. Numerical prediction of low-frequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2003, 23(6): 425-433.
- [37] Chen C, McDowell G R, Thom N H. Discrete element modelling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 35: 76-86.

## Discrete-Finite Element Analysis of Dynamic Behaviors of Ballasted Railway with Geogrid Reinforcement

Shuai Shao<sup>1</sup> Ying Yan<sup>2</sup> Shunying Ji<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup> *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*

<sup>(2)</sup> *Dalian Jiaotong University, School of civil and Safety Engineering, Dalian, 116028, China)*

**Abstract** Ballast is a special kind of geotechnical materials with obvious discrete characteristics. The non-uniform settlement of ballast resulting from long-term train loadings influences the regularity and stability of ballasted track and threatens the safety of passing trains. Geogrid reinforcement for railway ballast is an effective and economic method to strengthen the ballasted track. The discrete element method (DEM) has advantages in simulating discrete media, especially the ballast material. In order to study the effect of geogrid reinforcement on the ballast, this paper presents a coupled discrete-finite element method to investigate the interaction between geogrid and ballast particles. The clumps are employed to simulate the irregular shape of ballast particles; the beam elements are used to compute the response of geogrid; and the transmission of dynamic parameters on the contact interface is realized between the discrete and the finite element areas. The effect of geogrid reinforcement on the ballasted track under cyclic loadings is analyzed. To further study the mechanism of geogrid reinforcement, direct shear tests are conducted on the reinforced ballast particles. The results indicate that lateral and vertical displacements are both obviously decreased by the geogrid reinforcement. Geogrid can provide ballast particles with horizontal restraint and help to maintain the track geometry. The cohesive force and friction angle of ballast material are both enhanced after reinforced with geogrid. Geogrid can strengthen the interlock between ballast particles, enhance the strength of ballast material and prevent the shear band in the upper box from propagating into the nether box. According to the above conclusions, geogrid reinforcement is a valid technique to enhance the carrying capacity of ballasted track. In the high-speed and heavy-duty railway section, the installation of geogrid in ballast could contribute to enhancing the stability of ballasted track and reducing the maintenance costs. The coupled discrete-finite element model is applicable to simulating the behavior of geogrid-reinforced ballast.

**Key words** railway ballast, geogrid, direct shear test, coupled discrete-finite element method