

基于离散元法的聚氨酯固化道床力学特性

徐 旻, 郝录朝, 王 红

(中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 提出了一种基于黏接力链单元的聚氨酯固化道床数值仿真分析方法, 并在此基础上对聚氨酯固化道床与普通散体碎石道床在循环荷载作用下的力学性能进行了对比分析. 结果表明, 聚氨酯固化道床能够通过减小道床残余变形、改善道砟颗粒间接触状态的方式起到延缓道床累积沉降的目的; 聚氨酯材料在延缓道床累积沉降的同时, 也会导致轨枕的动位移增大.

关键词: 散体道床; 聚氨酯; 离散元法; 力学特性

中图分类号: U213.7

文献标志码: A

Mechanical Properties of Polyurethane Ballast Bed Based on Discrete Element Method

XU Yang, QIE Luchao, WANG Hong

(Science and Technology Management Department, China Railway Corporation, Beijing 100844, China)

Abstract: A discrete element method (DEM) model of polyurethane ballast bed based on bonding force chain unit was proposed in this paper, based on which, a comparative analysis between common ballast bed and polyurethane ballast bed under cyclic loading was conducted. The results show that polyurethane can lessen the ballasts bed cumulative settlement by reducing the residual deformation and improving the contact status of ballasts. Besides, polyurethane can also increase the dynamic displacement of the sleeper.

Key words: ballast bed; polyurethane; discrete element method (DEM); mechanical characteristic

传统的铁路轨道结构形式大致可分为两种, 即无砟轨道与有砟轨道. 其中, 无砟轨道具有整体性强、稳定性好、养护维修工作量少、轨道几何形位易于保持等优点. 但也存在着弹性差、轮轨作用剧烈、环境振动突出等问题, 一旦线路基础或轨道本身出现沉降或变形, 结构的维修将十分困难. 相比较而

言, 传统的有砟道床, 在正常工作条件下具有足够的强度、稳定性和弹性性能, 能承受和传递列车荷载、保持轨道的几何形态, 为轮轨相互作用及轨道各部件之间合理的荷载分配及协调的工作提供较有利的条件, 并具有易于维修的优点^[1]. 但有砟道床的缺点是由于道砟颗粒之间存在空隙, 在受到外部荷载及振动时, 道砟颗粒间会发生相互错动以及重新排列, 当颗粒间的接触力超过一定限度时, 道砟颗粒的各接触点(面)之间就会出现破碎、粉化等劣化形式, 会导致道床非均匀性累积变形, 进而引起轨面的几何平顺性难以保持的现象.

综合而言, 两种轨道结构各有优劣. 近年来, 如何采用新材料对传统的散体有砟轨道进行固化, 使其兼具有砟与无砟轨道各自的结构优点, 已成为世界各国学者研究的热点. 各国学者对胶黏道砟进行了大量研究. Kennedy 等^[2]采用三跨轨枕的循环荷载试验对胶黏道床的累积沉降特性进行了研究, 认为黏接固化后的道床相比与普通碎石道床可消除 99% 的残余变形, 且在累积荷载作用后具有良好的排水性能. Woodward 等^[3]对胶黏道砟在高速铁路岔区及路桥过渡段的应用进行了研究, 认为胶黏道砟可有效增强特殊区段散体道床的稳定性. 美国伊利诺伊州立大学的 Dersch 等^[4]较早从细观角度采用直剪室内试验研究了胶黏道砟的力学特性. 结果表明, 道砟胶可显著提高散体道床的剪切力学性能. 但同时也指出了胶黏道砟黏接强度往往大于岩石道砟颗粒, 在增强道床稳定性的同时也削弱了散体道床的弹性, 弱化了有砟轨道本身的力学性能优势, 因而未能得到广泛应用. Lee 等^[5]对刚性聚氨酯道砟胶进行了研究, 并提出了刚性聚氨酯固化材料力学特性与固化道床力学性能的对应关系. D' Angelo 等^[6]对改性沥青固化道床技术进行了研究, 并分析了改性沥青固化技术对于延缓道床累积变形的实际

收稿日期: 2018-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51808556); 中国铁路总公司科技研发计划(K2018G021, N2018G040, N2018G041)

第一作者: 徐 旻(1989—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为铁路轨道力学. E-mail: xuyangcars@qq.com

作用。

聚氨酯固化道床是在已经达到稳定状态的碎石道床内浇注聚氨酯发泡剂,通过化学反应,在道砟间完成发泡、膨胀和凝固,使聚氨酯发泡材料挤满道砟间的空隙,同时能黏结道砟颗粒。

在结构上,聚氨酯发泡剂既可使松散的道砟颗粒黏接为整体,降低道床的残余变形,又通过低刚度的柔性发泡介质避免了道砟之间的刚性黏接,确保了散体道床的弹性^[7]。此外,聚氨酯固化道床是一种新型的轨道结构,其使用的发泡材料会填充道砟之间的孔隙,进而杜绝了由风沙、扬尘等外部材料侵入所形成的道床脏污^[8]。但在聚氨酯固化道床的实际浇筑过程中,由聚氨酯混合材料不同配比所导致的发泡黏接密度、膨胀力差异以及浇筑时碎石道床密实度等因素均会对浇筑后聚氨酯固化道床的力学性能产生显著的影响,而前期研究仅是从实验角度对聚氨酯固化道床的宏观力学特性进行了分析^[9],而从细观角度针对聚氨酯固化道床力学机理的理论研究十分匮乏,导致了聚氨酯固化道床结构的经济性及其力学特性有待优化的现状,制约了聚氨酯固化道床结构的推广应用。

就聚氨酯固化道床的力学特性而言,其在经受列车碾压时主要依靠固结后碎石道砟颗粒间的咬合力与颗粒相互错动过程中的接触摩擦力承担列车荷载,而在卸载过程中聚氨酯材料又会呈现出类柔性弹簧阻尼体的结构特性,使发生相互错动的散体道砟回归原位,其细观接触行为主要受到散体道砟颗粒形状及排列方式的影响,在力学传递机理上具有较强的非连续性、非均匀性以及随机性。这使得原本就十分复杂的碎石道砟颗粒的作用机理更为复杂,且难以采用传统连续介质的有限元分析方法进行模拟。目前,国内外尚缺乏可借鉴的,能较好地模拟复杂聚氨酯固化道床结构的细观相互作用机理及在荷载作用下力学行为的本构模型。

为弥补上述研究不足,本文提出了一种基于离散单元法的聚氨酯固化道床结构仿真方法,并综合采用室内模型试验与理论研究相结合的手段,对聚氨酯固化道床的力学机理进行研究。

1 聚氨酯固化道床数值模型的建立及验证

1.1 聚氨酯材料接触本构力学模型

聚氨酯固化道床结构如图 1 所示。由于聚氨酯

固化道床在道砟颗粒之间附着了弹性发泡材料,在接触机理上,除保持了原有散体道床道砟颗粒之间的咬合及摩擦接触特性之外,在道砟颗粒发生细观的相对错动时,颗粒之间的接触行为还显现出了类黏弹性,这使得聚氨酯道床的力学行为更为复杂。而既有研究中通过离散道砟颗粒数值单元对散体道床进行模拟的方法^[10-12],其本构模型难以用于分析聚氨酯固化道床的接触特性。

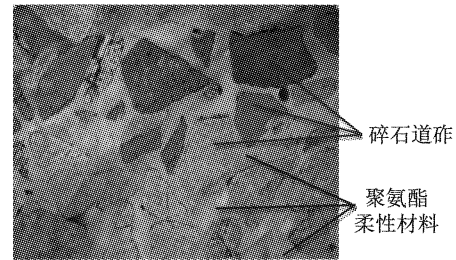


图 1 聚氨酯固化道床结构图

Fig. 1 Structure of polyurethane roadbed

针对这一问题,本文采用弹性黏接键本构接触模型对聚氨酯固化后颗粒之间柔性黏结关系进行模拟,其本构关系如图 2 所示。

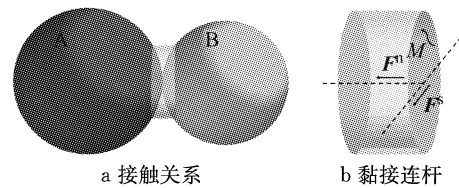


图 2 颗粒间的接触本构模型

Fig. 2 Interaction constitutive model of particle

图 2 中,A、B 球分别代表两道砟单元,当两个道砟颗粒产生接触时,依据当前时间步下颗粒间的重叠体积,按照改进圆锥算法的 Hertz-Mindlin 弹性体接触本构模型^[13]求解当前时间步中道砟颗粒间的接触力。道砟间通过黏接连杆相连,以此模拟道砟之间的聚氨酯黏接特性。将连杆上所受外力 F 分解为平行于两单元形心连线方向上的分力 F^n 以及垂直于两单元形心连线方向上的分力 F^s ,且有

$$F = F^n + F^s \quad (1)$$

设迭代步长为 Δt ,当前时步为 t ,下一代时步的颗粒间法向接触力 $F_{t+\Delta t}^n$ 可由公式(2)进行求解。

$$F_{t+\Delta t}^n = F_{t+\Delta t}^n + k^n \int_t^{t+\Delta t} a_t \Delta t \quad (2)$$

式中: $F_{t+\Delta t}^n$ 为 $t+\Delta t$ 时步 A 道砟所受到的法向合力; $F_{t+\Delta t}^n$ 为 $t+\Delta t$ 时步 A 道砟所受到的颗粒间的法向接触力; k^n 为道砟接触连杆的法向刚度; a_t 为当前时步道砟颗粒的加速度矢量,由公式(3)求得。

$$a_t = \frac{F_t^n}{m_A} + \frac{k^n \int_{t-\Delta t}^t a_{t-\Delta t} \Delta t}{m_A} \quad (3)$$

式中： F_t^n 为当前时步道砟颗粒 A 所受到的法向接触力； m_A 为道砟颗粒 A 的质量； $a_{t-\Delta t}$ 为上个时步道砟颗粒的合加速度，可由 a_t 与 Δt 求得当前时间步结束时的颗粒位移。同理有

$$F_{t+\Delta t}^s = F_{t+\Delta t}^s + k^s \int_t^{t+\Delta t} a_t \Delta t \quad (4)$$

式中： $F_{t+\Delta t}^s$ 为 $t+\Delta t$ 时步 A 道砟所受到的切向合力； $F_{t+\Delta t}^s$ 为 $t+\Delta t$ 时步 A 道砟所受到的颗粒间的切向接触力； k^s 为道砟接触连杆的切向刚度。

由上述推导可知，黏接连杆的切、法向刚度 k^s 、 k^n 直接决定了颗粒间黏接触关系的刚度。因此，必须确保所选取黏接连杆的切、法向刚度取值能够准确地模拟道砟颗粒间聚氨酯材料的力学特性。因此，本文开展室内圆桶试验对 k^s 、 k^n 进行参数标定。

1.2 聚氨酯室内圆桶试验

本文依据行业标准^[14]通过圆筒试验开展研究。圆筒试验中顶面加载板的直径为 350 mm。考虑散体道床中轨枕下部枕盒周围应有一定的临空范围，取聚氨酯固化道床试件的直径为 500 mm，参照规范中高速铁路有砟道床厚度不小于 350 mm 的设计要求，取围压试件的高度为 350 mm。行业标准^[10]中对聚氨酯材料性能及试件的制备工艺作出了详细的要求，本文即参照这一标准对加载前的聚氨酯固化单元进行试制。参照规范^[14]要求，在试验过程中，取峰值荷载为 12.5 kN。并在桶顶部加载板处设置 4 个位移传感器，以检测荷载板的垂向位移，如图 3 所示。

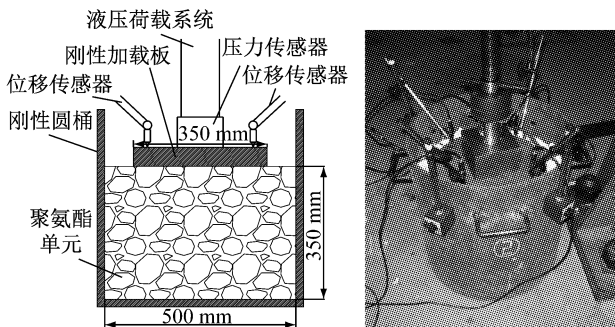


图 3 侧限室内模型试验

Fig.3 Lateral confinement model test

1.3 聚氨酯固化道床离散元模型的建立及验证

按照室内试验的几何、物理参数建立数值模型。则基于激光扫描法^[15]所建立的精细化聚氨酯固化道床离散元数值模型如图 4 所示。

沿用前期研究中验证后的道砟颗粒力学参数，具体取值如表 1 所示^[15]。

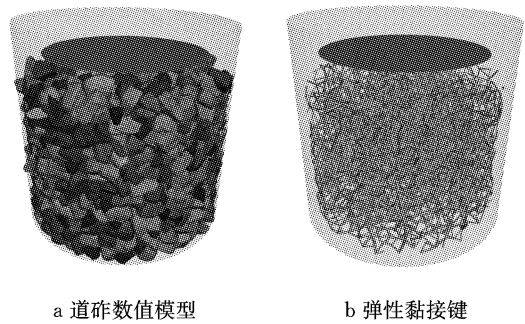


图 4 离散元数值模型

Fig.4 Numerical model of DEM

表 1 离散元模型力学参数取值

Tab.1 Parameters of DEM model

参数	取值
墙体切、法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1×10 ⁹
道砟颗粒的密度/(kg·m ⁻³)	2 700
道砟颗粒的摩擦系数	0.5
道砟颗粒切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	9.6×10 ⁸
道砟颗粒法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	6.3×10 ⁸
侧壁摩擦系数	0.1

通过数值试验对聚氨酯材料的关键力学参数 k^s 、 k^n 进行标定。选取不同的参数组合进行数值试验，当 $k^n=6.2 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 且 $k^s=3.1 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时，所得到数值仿真结果与室内试验结果对比如图 5 所示。

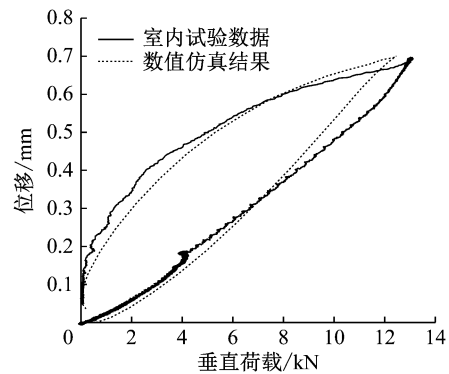


图 5 室内试验结果与仿真结果对比

Fig.5 Comparison of laboratory and numerical test

由图 5 可以看出，当选择合理的黏接刚度参数时，所建立的数值模型能较好地模拟聚氨酯固化道床的力学特性。本文即采用该参数对聚氨酯材料进行模拟。

2 聚氨酯固化道床力学特性

2.1 聚氨酯固化道床沉降力学特性

散体道床会经受来自列车的循环荷载，而道床在循环荷载作用下所产生的累积沉降是导致有砟轨

道需要进行捣固、稳定等养护维修作业的根本原因,直接关系到轨面的平顺性及线路的养护维修成本.因此,本文基于数值模拟对道砟在轨枕作用下的沉降力学行为进行研究.既有研究表明^[16],对于散体材料,当模型边界大于散体材料颗粒平均直径的 8 倍以上时,模型边界效应可以忽略.本文所选取的道砟颗粒平均直径为 43 mm.基于此,参考前期研究成果^[11],选取承轨槽附近宽 70 m,长 50 m 区域内的道床进行仿真,并基于前文 1.3 节中标定后的黏接参数针对轨枕底部以下区域设置黏接连键以模拟聚氨酯材料,所建立的精细化数值模型如图 6 所示.

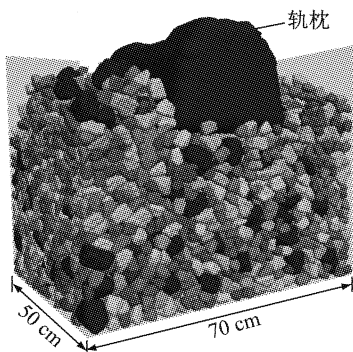


图 6 道砟箱离散元数值模型
Fig. 6 DEM model of ballast box

在工程实际中,聚氨酯固化材料的强度可通过不同原材料组分配比及浇筑工艺进行控制,而材料强度会直接影响聚氨酯道床的经济性.本文对聚氨酯材料拉伸强度分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 以及普通碎石道床 5 种工况进行分析,以期揭示聚氨酯固化道床的力学特性,并为聚氨酯固化道床材料的选型及经济技术比的优化提供参考.对轨枕施加频率为 5 Hz,幅值为 12.5 kN 的循环荷载,得到的不同道床位移随循环荷载作用次数变化的曲线如图 7 所示.

图 8 给出了不同道床累积沉降量及每个周期内道床的动位移幅值,其中工况 1 为普通碎石,工况 2~5 为抗拉强度分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 的聚氨酯固化道床.

结合图 7、图 8 可以看出,抗拉强度为 0.2 MPa 的聚氨酯固化道床的累积沉降约为普通碎石道床的 50%,且会随着聚氨酯抗拉强度的增加而减少,但当聚氨酯材料的抗拉强度大于 0.2 MPa 时,再增大聚氨酯材料抗拉强度所产生的延缓沉降效果并不显著,且会导致道床的动位移增大.

为进一步揭示导致两种道床结构力学行为差异的内在机理,分析了沉降稳定后单次荷载作用下普

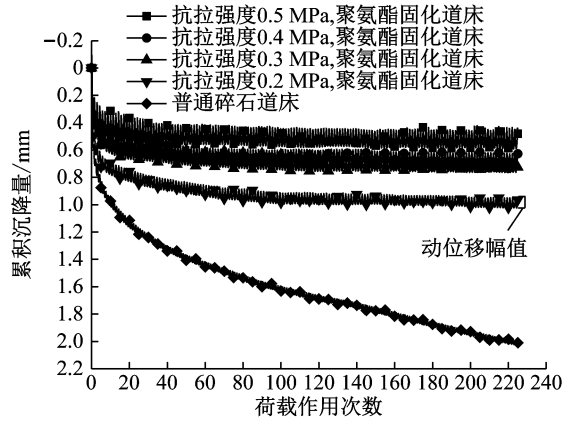


图 7 不同道床累积沉降特性对比

Fig. 7 Comparison of cumulative settlement of different ballast beds

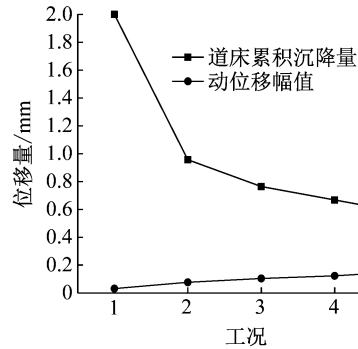


图 8 不同道床累积沉降量及动位移幅值

Fig. 8 Comparison of cumulative settlements and dynamic displacements of different ballast beds

通碎石道床与聚氨酯固化道床的平均位移曲线,结果如图 9 所示.

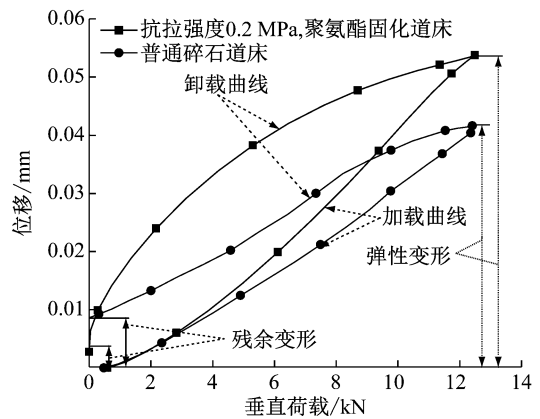


图 9 两种道床结构单次荷载曲线

Fig. 9 Comparison of single load of different ballast beds

由图 9 可以看出,聚氨酯固化道床在整个加卸载过程中会产生两类位移,一是在受外荷载条件下,道床会产生一定量的弹性变形,该部分变形可随卸载而恢复,第二类则是整个卸载过程完成后,道床所

产生的残余变形,卸载后难以恢复,是导致散体道床需要进行频繁养护维修的主要原因.由图 9 还可以看出,当处于荷载峰值时,普通碎石道床的最大弹性变形量为 0.41 mm,聚氨酯固化道床为 0.54 mm;普通散体碎石道床在荷载作用后不可恢复的残余变形量为 0.09 mm,而聚氨酯固化道床的残余变形量仅为 0.04 mm,这就是两种道床结构在循环荷载作用下累积沉降量产生差异的根本原因.

2.2 聚氨酯固化道床应力及分布规律

道床内部的动应力过大是导致道砟颗粒发生破碎、粉化的直接原因.而应力分布的均匀性又是评判散体道床力学状态的重要指标.因此,本节对不同道床在每个周期荷载作用下的平均动应力进行分析,其时程曲线如图 10 所示.

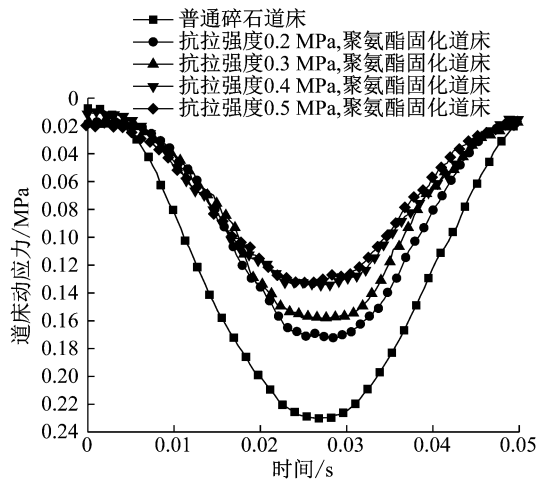


图 10 不同道床动应力对比

Fig. 10 Comparison of dynamic stress of different ballast beds

由图 10 可以看出,聚氨酯道床内部的动应力明显小于普通碎石道床,且会随着聚氨酯材料抗拉强度的增大而减小,说明聚氨酯材料能有效地减小道床内部的动应力.

道床内道砟颗粒的接触力分布规律是判定道砟接触及应力传递状态的重要标准,应力分布均匀的散体道床能够更为有效地衰减列车的荷载,并使之均匀地传递至下部基础,从而延长道床的使用寿命.

由图 11 可以看出,聚氨酯固化道床的接触力分布更为均匀,而普通碎石道床内部道砟颗粒间的接触力在轨下基本呈梯形分布,且接触应力主要集中于轨枕底部.文献[17]也佐证了这一观点,并指出轨枕底部道砟颗粒间的接触力过大是导致工程实际中道砟粉化、破碎多集中于轨枕底部的直接原因.就颗粒间接触力的峰值来看,普通碎石道床道砟颗粒间

的最大接触力为 4 326 N,而聚氨酯固化道床的最大接触力为 2 049 N,仅为普通碎石道床的 47.3%,说明聚氨酯固化道床能够改善道砟颗粒的接触状态.

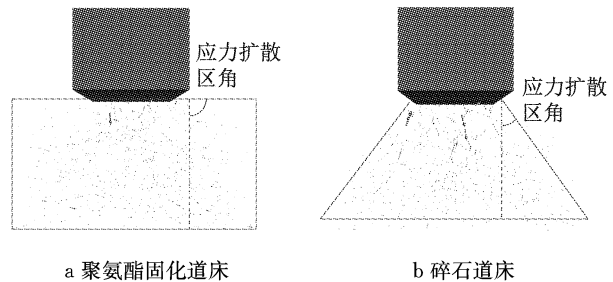


图 11 道砟接触力分布

Fig. 11 Contact force distribution of ballast

3 结论

本文提出了一种基于黏接力链单元的聚氨酯固化道床数值仿真方法,结合室内试验与数值分析,对聚氨酯固化道床与普通散体碎石道床力学性能差异的产生机理进行了对比分析,主要结论如下:

(1) 所提出的基于黏接力链单元的聚氨酯固化道床数值仿真方法能较好地模拟聚氨酯固化道床的力学特性,可为聚氨酯固化道床的数值模拟提供参考.

(2) 聚氨酯固化道床能显著延缓散体碎石道床的累积沉降,其主要原因是由于固化材料在道砟颗粒之间形成了柔性黏接键,使得散体道砟颗粒间具有一定的抗拉强度,从而抑制了道砟颗粒之间的相对错动,因此在单次荷载作用下会产生更小的残余变形.

(3) 增强聚氨酯材料的抗拉强度能够减小道床的累积沉降,但当聚氨酯材料的抗拉强度大于 0.2 MPa 时,再增大聚氨酯材料抗拉强度所产生的延缓沉降效果并不显著.此外,聚氨酯固化材料抗拉强度的增大还会引起轨枕的动位移增加.因此,建议在后续工作中,结合线路的实际运营情况,从道床、扣件刚度合理匹配的角度,提出不同线路条件下聚氨酯固化材料的合理力学性能设计要求.

(4) 聚氨酯固化道床与散体碎石道床在应力分布规律上存在显著的差异,普通碎石道床内部道砟颗粒间的接触力在轨下基本呈梯形分布,而聚氨酯固化道床的枕下应力基本呈矩形分布,具有更大的应力扩散角,且颗粒间的最大接触力明显小于散体碎石道床,说明聚氨酯道床能更好地分散道床应力.因而,既有基于轨下梯形应力分布假设的碎石道床

强度设计理论难以适用于聚氨酯碎石道床,建议针对聚氨酯固化道床结构的力学特性提出新的设计理论。

参考文献:

- [1] SELIG E T, WATERS J M. Track geotechnology and sub structure management[M]. London: Thomas Telford, 1994.
- [2] KENNEDY J, WOODWARD P K, MEDERO G, *et al.* Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 615.
- [3] WOODWARD P K, EI KACIMI A, LAGHROUCHE O, *et al.* Application of polyurethane geocomposites to help maintain track geometry for high-speed ballasted railway tracks[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2012, 13 (11): 836.
- [4] DERSCH M S, TUTUMLUER E, PEELER C T, *et al.* Polyurethane coating of railroad ballast aggregate for improved performance[C]// Joint Rail Conference. Urbana: [s. n.], 2010:337-342.
- [5] LEE S H, LEE S J, PARK J G, *et al.* An experimental study on the characteristics of polyurethane-mixed coarse aggregates by large-scale triaxial test [J]. Construction and Building Materials, 2017, 145:117.
- [6] D'ANGELO, GIACOMO, THOM N, *et al.* Bitumen stabilized ballast: A potential solution for railway track-bed [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124:118.
- [7] 韩自力, 鄢录朝, 王红, 等. 聚氨酯固化道床技术研究与应用 [J]. 中国铁路, 2017(5):1.
HAN Zili, QIE Luchao, WANG Hong, *et al.* Research and application of polyurethane ballast bed technology [J]. Chinese Railways, 2017(5):1.
- [8] 高亮, 徐畅, 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.
GAO Liang, XU Yang, YIN Hao. Experiment research of shear behavior of railway ballast Influenced by different fouling material [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41 (1):1.
- [9] 王红, 许永贤, 许良善, 等. 重载铁路聚氨酯固化道床结构形式及其合理参数的研究[J]. 铁道建筑, 2014(7):129.
WANG Hong, XU Yongxian, XU Liangshan, *et al.* Reasonable parameter and form of polyurethane ballast bed of heavy haul railway [J]. Railway Engineering, 2014(7):129.
- [10] 赵金凤, 严颖, 季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析[J]. 固体力学学报, 2014(2): 124.
ZHAO Jinfeng, YAN Ying, JI Shunying. Analysis of direct shear test of solid-rock mixture based on discrete element model [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014(2): 124.
- [11] HUANG H, TUTUMLUER E. Discrete element modeling for fouled railroad ballast[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3306.
- [12] 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 Geomechanics. 2014, 14(1): 34.
- [13] SUHR B, SIX K. Parametrisation of a DEM model for railway ballast under different load cases[J]. Granular Matter, 2017, 19(4):64.
- [14] 中国铁路总公司. 聚氨酯泡沫固化道床暂行技术条件: TJ/GW 115—2013 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
China Railway. Tentative specification of polyurethane ballast bed: TJ/GW 115—2013 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013.
- [15] 徐畅, 高亮, 蔡小培, 等. 基于激光扫描法的铁路道砟级配对道床动力特性影响的离散元研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36 (5):127.
XU Yang, GAO Liang, CAI Xiaopei, *et al.* Influences of ballast gradation on railway ballast bed dynamic characteristics based on laser scanning and discrete element method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5):127.
- [16] BUDDHIMA Indraratna. Behaviour of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing—a discrete element simulation[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 14 (10):3.
- [17] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method[J]. Granular Matter, 2007, 9(1/2):69.