

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311008



# 列车轴质量和土工格室加固道砟 对路基沉降的影响

姚学昌<sup>1</sup>, 林福宽<sup>2</sup>

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 515000;  
2. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 建立有砟轨道-路基三维有限元模型和土工格室模型, 利用相位荷载模拟列车动荷载, 研究列车轴质量和土工格室加固道砟对路基沉降的影响。模拟结果表明: 在正弦相位荷载作用下, 各轨枕之间位移变化基本一致; 随着列车轴质量的增加, 有砟轨道沉降显著增加; 铺设土工格室加固后, 有砟轨道的侧向位移和竖向沉降分别降低了约60%和11%; 在重载情况下, 土工格室加固效率有所降低, 但改变土工格室刚度可以改变其加固效率; 当土工格室刚度在400~800 MPa时, 对重载路基的加固效果较好。

**关键词:** 道床沉降; 土工格室; 轴质量; 数值模拟; 动荷载

中图分类号: U 213.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0226-07

## Influence of Train Axle Mass and Geocell Reinforcement Ballast on Roadbed Settlement

YAO Xuechang<sup>1</sup>, LIN Fukuan<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Highway Construction Limited Company, Guangzhou 515000, China;  
2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Limited Company, Beijing 100088, China)

**Abstract:** A 3-dimensional finite element model and a geocell model of ballast subgrade are established. The phase loads are used to simulate the train dynamic load. The influence of train axle mass and geocell reinforcement ballast on roadbed settlement is studied. The simulation results show that the displacement changes between each sleeper are basically consistent under the action of sinusoidal phase load. With the increasing of the train axis mass, the ballast settlement increases obviously. After laying geocell reinforces, the lateral displacement and vertical settlement of ballast reduce by 60% and 11%, respectively. Under the heavy load conditions, the reinforcement efficiency of geogrid reduces, but the stiffness of geocell can change its reinforcement efficiency. When the stiffness of geocell is between 400-800 MPa, the reinforcement effect on heavy-load roadbeds is favorable.

**Keywords:** track bed settlement; numerical simulation; dynamic load; geocell; axle mass

近年来,我国铁路建设进入了全面发展阶段,全国铁路营业里程飞速增长,高速铁路里程居世界第一位<sup>[1]</sup>。有砟轨道作为一种传统的轨道结构形式,自身的减震性好且造价低,在车速小于300 km·h<sup>-1</sup>的高速铁路线路中依然是首选<sup>[2]</sup>。铁路运输的重载化和列车的高速化加剧了列车及线路系统的动力相

收稿日期: 2023-11-08

通信作者: 姚学昌(1971-),男,高级工程师,主要从事高速公路建设的研究。E-mail:372643491@qq.com。

基金项目: 广澳高速公路改扩建建科研资助项目(GAGSKY-2022-02)

互作用,路基的变形和破坏出现了一些新的特征,路基动力特性成为研究的关键<sup>[3]</sup>。

国内外学者针对列车的行车速度和荷载对铁路路基的影响进行大量研究。文献[4-6]基于 ABAQUS 三维有限元软件,分析高速和重载列车荷载对铁路路基的作用。蒋红光等<sup>[7]</sup>利用室内模型试验,得到有砟轨道结构荷载的分布形式。徐鹏等<sup>[8]</sup>建立列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型,比较仿真计算与秦沈线综合试验实测结果,得出基床表面变形、应力的动态响应结果。Alshaer<sup>[9]</sup>通过建立室内物理模型,研究有砟轨道的动力学行为和沉降,得到有砟轨道的加速度、压力及沉降等结果。

在铁路路基的加固研究方面,周顺华等<sup>[10]</sup>通过研究列车振动产生的应力波,得到动应力在土工格室和路基中的衰减规律。邓鹏等<sup>[11]</sup>在试验的基础上,借助 ABAQUS 三维有限元软件对填料-格室相互作用进行了模拟,得到填料强度、土工格室刚度及路基压缩性对路堤力学响应的影响。Hegde 等<sup>[12]</sup>对现场实测数据与软件计算结果进行对比,分析不同土工格室参数对加筋基床性能的影响规律。Indraratna 等<sup>[13]</sup>通过大型三轴试验,研究循环荷载作用下路基加筋与未加筋的性能,分析循环次数、压力及列车引起的振动频率对加固效果的影响。文献[14-15]通过一系列模型试验,得到土工格室能有效增加有砟轨道的刚度和强度,同时减少有砟轨道的竖向沉降和横向扩散。Satval 等<sup>[16]</sup>分析土工格室加固对有砟轨道位移及路基应力分布的影响规律。

已有研究的数值模拟多采用集中荷载或正弦同步荷载,未考虑铁轨与轨枕之间的作用关系及相邻轨枕的荷载分担,不能真实地反映列车车轮的作用效果。同时,利用列车速度、荷载及路基加固做整体性分析的情况较少。基于此,本文对土工格室加固道床的影响因素进行研究。

## 1 有砟轨道-路基有限元模型

### 1.1 有砟轨道-路基三维模型

有砟轨道-路基三维模型从上到下依次为铁轨、轨枕、有砟轨道、土工格室和路基<sup>[17]</sup>,采用长为 2.6 m 的Ⅲ型有挡肩混凝土轨枕,每千米铁轨铺设 1 667 根轨枕。有砟轨道表面宽为 3.5 m、底面宽为 5.5 m、坡度为 1∶1.75、路基面宽度为 7.7 m、厚度为 2.5 m、纵向长度为 2.72 m。土工格室采用 150 mm×150 mm 的方孔形式样,厚度为 1 mm,高度为 150 mm。土工格室布置于有砟轨道中,由于有砟轨道与土工格室之间存在咬合相互作用,所以模型中假设二者没有滑移,采用内置区域约束<sup>[18]</sup>。循环荷载通过点荷载施加在每根轨枕上,因此,不对铁轨进行建模。有砟轨道-路基三维模型,如图 1 所示。

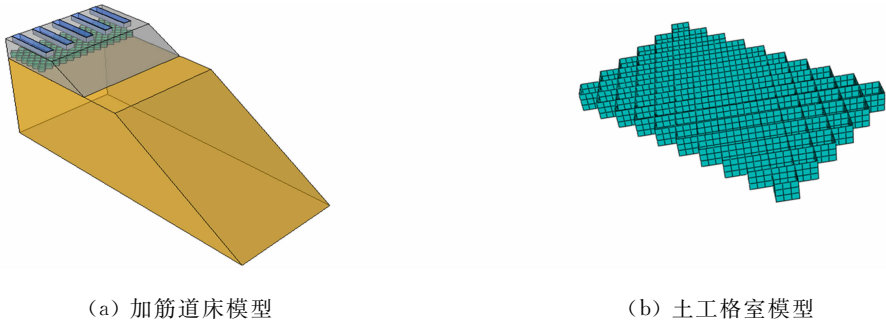


图 1 有砟轨道-路基三维模型

Fig. 1 3-dimensional model of ballast-subgrade

为了分析列车循环荷载对路基沉降的影响,轨枕、道床和路基均采用 8 结点线性 6 面体单元(C3D8R),土工格室采用 4 结点 4 边形膜单元(M3D4R),其中,轨枕和土工格室选用线弹性本构模型,道床和路基采用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型,各部件结构的材料参数参考 Leshchinsky<sup>[14]</sup>等的模型试验。材料参数,如表 1 所示。表 1 中: $\rho$  为密度; $E$  为弹性模量; $\nu$  为泊松比; $\varphi$  为内摩擦角; $\psi$  为剪胀角; $c$  为粘聚力。

表 1 材料参数  
Tab. 1 Material parameters

| 参数                                 | 轨枕              | 土工格室 | 有砟轨道  | 路基    |
|------------------------------------|-----------------|------|-------|-------|
| $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 2 000           | 950  | 1 500 | 1 700 |
| $E/\text{MPa}$                     | $1.1\times10^4$ | 380  | 70    | 20    |
| $\nu$                              | 0.25            | 0.35 | 0.35  | 0.35  |
| $\varphi/(\text{^\circ})$          | —               | —    | 45    | 15    |
| $\psi/(\text{^\circ})$             | —               | —    | 15    | 1     |
| $c/\text{kPa}$                     | —               | —    | 1     | 30    |

为了便于对模型的位移沉降和动力响应进行分析,选取部分位置进行布设参考点,主要位置为轨枕底部(RP1~RP3)、土工格室底部(RP4~RP6)和有砟轨道底角(RP7~RP9)。模型参考点布置,如图 2 所示。对各个参考点设置历程数据输出,包括加速度、位移和应力等物理量,每间隔 10 个增量步输出一次数据。

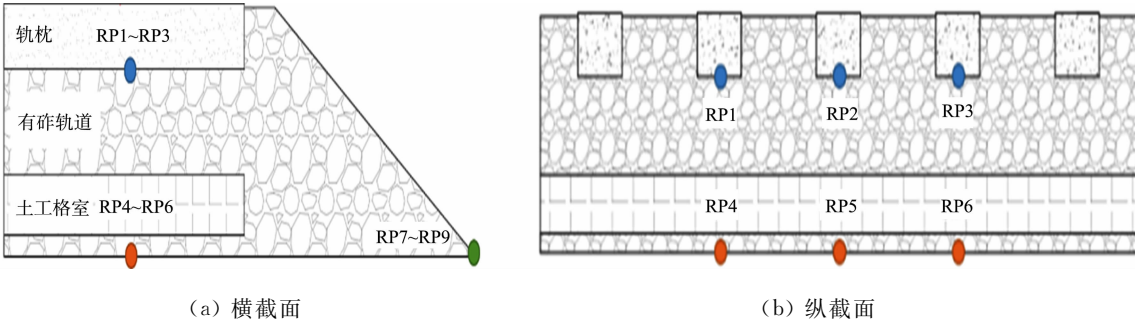


图 2 模型参考点布置  
Fig. 2 Reference point layout of model

1.2 列车循环荷载模型

列车荷载对路基的作用包括两方面<sup>[19]</sup>:一方面是上部结构的质量在路基上的应力,称为静荷载;另一方面是列车行驶时,上部结构的质量在路基上的动应力,称为动荷载。列车在轨枕上运动时,不同轨枕上分担的压力不同。根据陈成等<sup>[20]</sup>的假设,车轮的正下方轨枕承担 50% 荷载,左、右相邻轨枕各承担 25% 荷载。中国铁路高速列车(CRH)列车组的相邻轮组轴距约为 2.4 m,轨枕间距约为 600 mm<sup>[21]</sup>,每 4 根轨枕的间距为循环加载的波长,其不受频率的影响。假设作用在轨道上的荷载是连续的,即有很多个车轮组连续通过,则轨枕受到的荷载呈周期变化。

模型的循环荷载直接施加在轨枕上,荷载采用形式为 90° 正弦移相荷载(异步荷载)。根据文献[15-16]给出的周期荷载计算方法及文献[20]的相位荷载计算方法,90° 正弦移相荷载,如图 3 所示。4 个轨枕上的荷载( $p_{sle1}$ ,  $p_{sle2}$ ,  $p_{sle3}$ ,  $p_{sle4}$ )数学表达式分别为

$$p_{sle1} = q_{min} + A \times [1 + \cos(\omega t)], \tag{1}$$

$$p_{sle2} = q_{min} + A \times \left[1 + \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right], \tag{2}$$

$$p_{sle3} = q_{min} + A \times [1 + \cos(\omega t - \pi)], \tag{3}$$

$$p_{sle4} = q_{min} + A \times \left[1 + \cos\left(\omega t - \frac{3}{2}\pi\right)\right]. \tag{4}$$

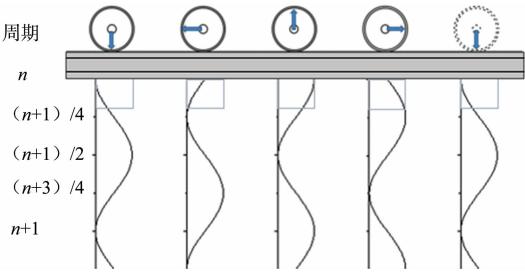


图 3 90° 正弦移相荷载  
Fig. 3 90° sinusoidal phase-shifting load

式(1)~(4)中: $q_{min}$ 为最小荷载(钢轨及轨枕的自质量);

$A$  为所施加荷载的幅值; $\omega$  为周期荷载的圆频率; $t$  表示荷载作用的时间。

考虑到三维有限元模型的结构特性,对模型施加相应的人工边界条件,其中,约束模型两个横断面向  $Z$  方向位移;约束模型对称面向  $X$  方向位移;路基底面采用固定约束;其余均为自由面。

2 列车轴质量对路基的影响

2.1 加筋与未加筋有砟轨道沉降影响

90% 以上的有砟轨道沉降归咎于道床的沉降<sup>[21]</sup>,利用土工格室等材料,可以对路基变形进行一定的改善。为了对加筋和未加筋有砟轨道的竖向沉降和侧向位移进行对比,选用相同轴质量(15 t)的列车荷载,列车运行速度为  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,经过万次循环加载,记录有砟轨道的位移变化。加筋与未加筋情况下有砟轨道的竖向沉降及侧向位移,如图 4 所示。图 4 中: $s_v$  为有砟轨道的竖向沉降; $s_l$  为有砟轨道的侧向沉降。

由图 4 可知:加筋与未加筋的沉降趋势较一致,大部分沉降发生在初期阶段,且在前 100 个循环,侧向位移和竖向沉降增长很快,在约 1 000 次循环荷载之后,呈现出周期振荡变化,这与道床在循环荷载

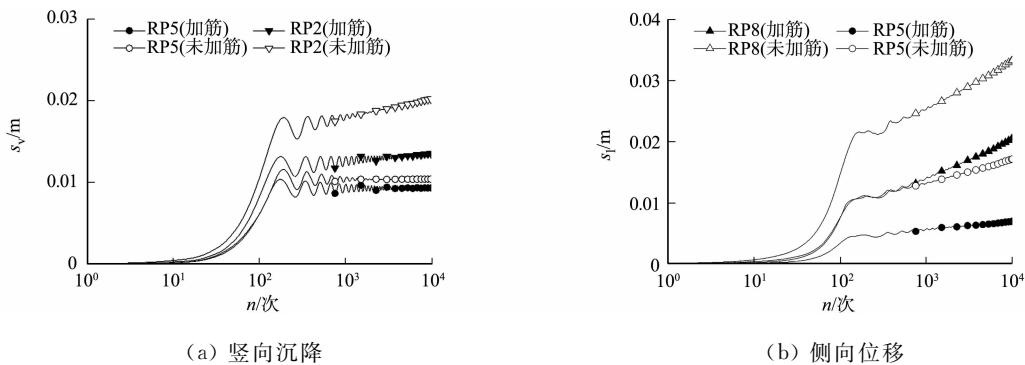


图 4 加筋与未加筋情况下有砟轨道的竖向沉降及侧向位移

Fig. 4 Vertical settlement and lateral displacement of ballast with and without reinforcement

作用下的力学特性相符合;加筋后有砟轨道的竖向沉降和侧向位移都有了明显的减小,有砟轨道的竖向沉降从 0.010 4 m 减小到 0.009 3 m,减小了 11%,侧向位移从 0.017 2 m 减小到 0.006 9 m,减小了 60%。因此,土工格室对有砟轨道侧向位移的限制更为突出,起到了应力分散作用和膜作用,增大了有砟轨道的弹性模量,使得有砟轨道竖向位移在循环荷载下有所减小。

循环荷载作用下有砟轨道竖向沉降<sup>[14]</sup>,如图 5 所示。土工格室加固会引起有砟轨道整体结构中应力的变化,有砟轨道与路基交界面上的应力变化尤为明显。路基上表面应力分布,如图 6 所示,图 6 中: $\sigma$  为应力; $L$  为土工格室单元尺寸。

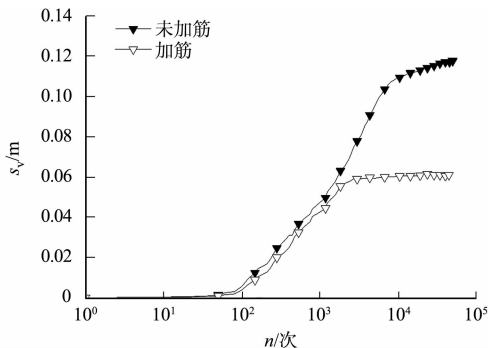


图 5 循环荷载作用下有砟轨道竖向沉降<sup>[14]</sup>

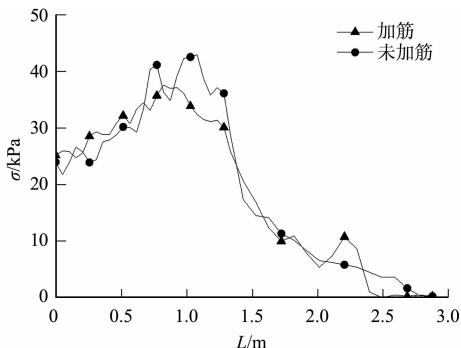


图 6 路基上表面应力分布

Fig. 5 Vertical settlement of ballast under cyclic load<sup>[14]</sup>

Fig. 6 Stress distribution on subgrade surface

由图 6 可知:随着  $L$  (实际轨枕的中点) 的增加,应力先增大后减小,且应力主要集中于轨枕加载位置正下方;加筋后应力峰值减小约 15%,加固后的有砟轨道通过膜效应与颗粒材料的组合形成刚性垫层,使应力分布更加均匀。

土工格室变形云图,如图 7 所示。由图 7 可知:土工格室在竖向荷载作用及有砟轨道的挤压下产生了累积变形,且在轨枕接触点的正下方位置的格室的竖向沉降变化最大,靠近肩部有砟轨道处格室单元相较于轨枕下的格室单元的侧向变形更为明显。

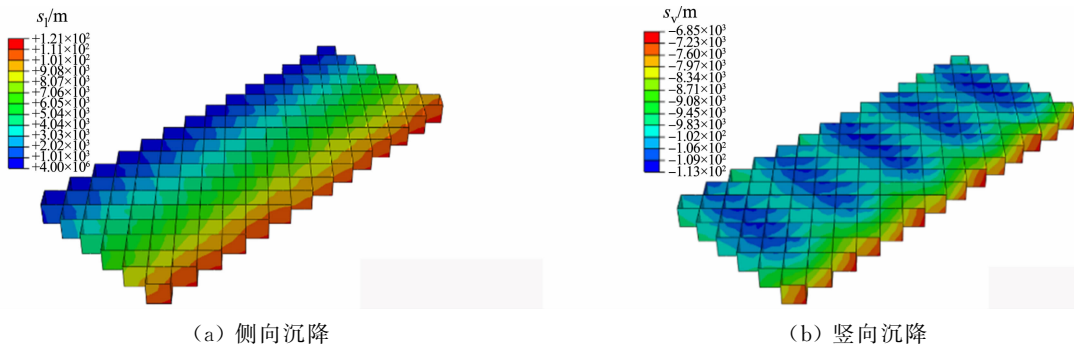


图 7 土工格室变形云图

Fig. 7 Deformation diagram of geocell

2.2 列车轴质量对有砟轨道的沉降影响

通过对轨枕施加不同的轴质量荷载,进行万次循环运算,不同轴质量( $m$ )下有砟轨道的竖向沉降及侧向位移,如图 8 所示。货运列车轴质量为 30 t。由图 8 可知:有砟轨道位移随着轴质量的增加明显提高;30 t 轴质量条件下有砟轨道的竖向沉降和侧向位移分别为 0.025 4 m 和 0.029 6 m,比 15 t 轴质量下分别增加了约 59%和 42%。因此,列车轴质量是有砟轨道竖向沉降及侧向位移的关键性影响因素,对于重载铁路,在选用土工格室加固时有更高的要求。

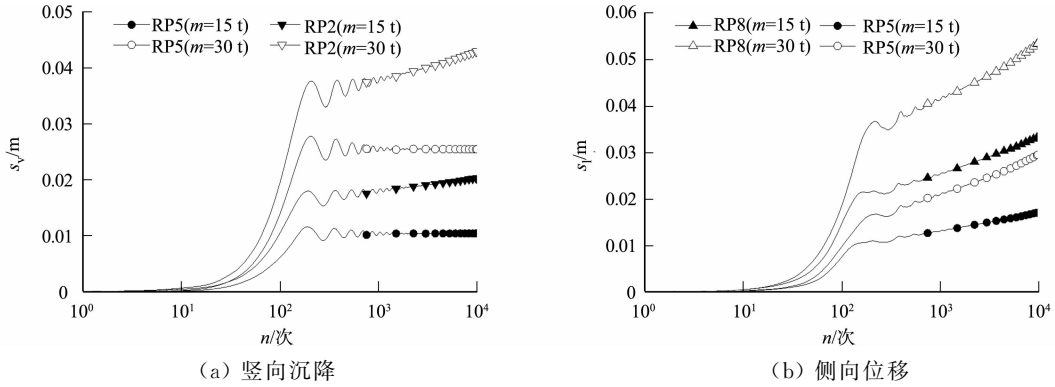


图 8 不同轴质量下有砟轨道竖向沉降及侧向位移

Fig. 8 Vertical settlement and lateral displacement of ballast under different axis mass

2.3 土工格室的参数影响

当土工格室刚度(弹性模量)从 200 MPa 逐渐增加到 50 GPa 时,土工格室刚度对轨枕沉降( $s_s$ )的影响,如图 9 所示。由图 9 可知:在一定范围内,土工格室刚度越大,路基加固的效果就越好;当土工格室刚度大于 10 GPa 后,进一步提升弹性模量对减小轨枕沉降的意义已经不大。由于采用土工格室刚度极大的填充材料(混凝土格室或钢槽)加固效益较低,应采用恰当的土工格室刚度。结合计算结果,在选用土工格室加固重载铁路时,土工格室刚度在 400~800 MPa 时已达到较好效果。

保持格室其他参数不变,选用厚度分别为 1,2,3,4,5 mm 的土工格室,取 2 号轨枕下表面参考点 RP2 为沉降记录点,则 10 000 次循环荷载后,土工格室壁厚( $h$ )对轨枕沉降的影响,如图 10 所示。

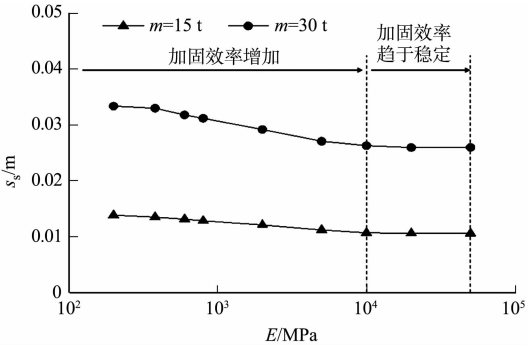


图 9 土工格室刚度对轨枕沉降的影响

Fig. 9 Influence of geocell stiffness on sleeper settlement

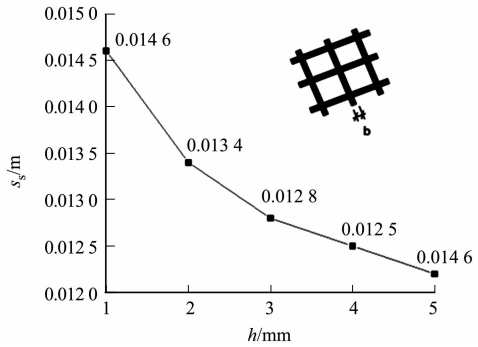


图 10 土工格室壁厚对轨枕沉降的影响

Fig. 10 Influence of geocell wall thickness on sleeper settlement

由图 10 可知:增大土工格室的壁厚可以有效减小轨枕沉降,壁厚从 1.00 mm 增大到 2.00 mm 时,轨枕沉降减小最快;1.00 mm 壁厚的土工格室最终轨枕沉降为 0.014 6 m,5.00 mm 壁厚的土工格室最终沉降为 0.122 0 m,相比于未加固的最终轨枕沉降 1.95 cm,分别降低了 25%和 37%。但是超出一定范围后增加土工格室壁厚加固效率明显降低,且成本相应增加,在实际工程中综合经济因素和加固效果综合选择合适壁厚的土工格室。

土工格室边长变化对轨枕沉降的影响,如图 11 所示。保持格室其他参数不变,选用边长分别为 100,150,200,250 mm 的土工格室,将其布置在交界面以上 0.05 m 的轨枕下方区域。取 2 号轨枕下表面参考点 RP2 为沉降记录点,则 10 000 次循环后,由图 11 可知:随着土工格室单元边长的增加加固效



果呈衰减的趋势,100,150,200,250 mm 边长的最终轨枕沉降分别为0.013 5,0.014 6,0.015 3,0.016 1 m,边长 100 mm 的土工格室相比于边长 250 mm 的格室减小了 16%的最终沉降。另外,由于有砟轨道的模拟采用有限元法而非离散元法,有砟轨道颗粒为非连续体,格室孔径的最佳加固比在文中无法体现,需要进一步采用有限元-离散元耦合的方法进行研究。

2.4 土工格室铺设方案的探优

竖向位置寻优示意图,如图 12 所示。由图 12 可知:土工格室平面布置范围为轨枕下方,采用单层布置时,竖向位置分别为交界面以下 0.05 m、交界面以上 0.05,0.10,0.15 m;而采用双层布置时,竖向位置为交界面以上 0.05 和 0.20 m。

取 2 号轨枕下表面参考点 RP2 为沉降记录点,取 RP2 点最后 10 000 次循环的平均沉降为最终稳定沉降,则 10 000 次循环荷载后,土工格室埋置深度( $d$ )对轨枕沉降的影响,如图 13 所示。

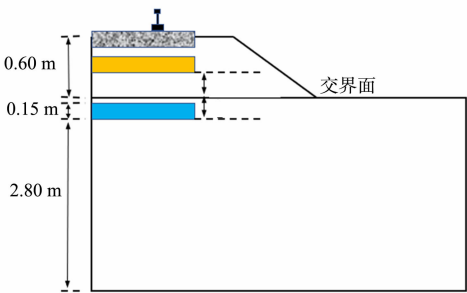


图 12 竖向位置寻优示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of vertical position optimization

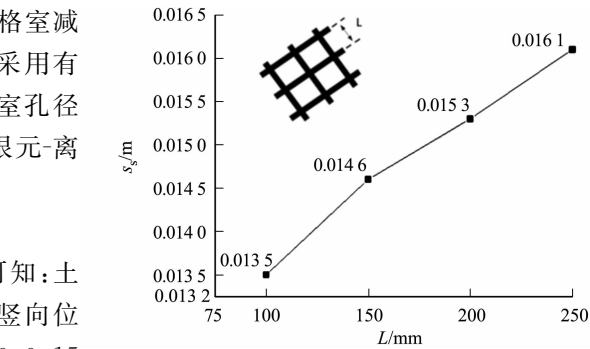


图 11 土工格室边长变化对轨枕沉降的影响  
Fig. 11 Influence of geocell side length on sleeper settlement

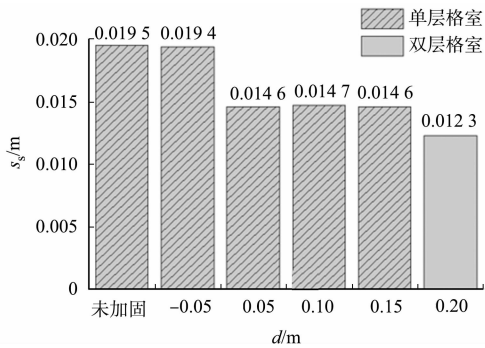


图 13 土工格室埋置深度对轨枕沉降的影响  
Fig. 13 Effect of geocell depth on sleeper settlement

由图 13 可知:布置在路基的土工格室对沉降的加固效果显著低于布置在有砟轨道中,而布置在有砟轨道中的土工格室的加固效果对其竖向位置不敏感,距离交界面 0.05,0.10,0.15 m 的 3 种格室的稳定沉降基本一致,布置在上方的格室加固效果略好,即距离轨枕近的土工格室加固效果略好;双层格室可以有效提升加固效果,单层格室最终沉降为 0.014 6 m,双层格室最终沉降为 0.012 3 m,同等条件下不加固的最终沉降为 0.019 5 m;单层格室减小了 25.1%沉降,双层格室减小了 36.9%沉降,但是同样的成本也会双倍增加。

3 结论

- 1) 有砟轨道沉降在初期 1 000 次循环荷载之后,经过振荡变化阶段后进入稳定状态。有砟轨道嵌入土工格室模型后,竖向沉降和侧向位移均明显减小,格室对侧向位移限制更明显。
- 2) 轨枕底部应力分布随着距对称面距离增加呈先增大后减小趋势,主要集中于轨枕加载位置正下方。土工格室在循环荷载下产生累积变形,正下方格室竖向沉降最大,靠近肩部有砟轨道处格室侧向变形更为显著。
- 3) 30 t 轴质量条件下有砟轨道的竖向沉降和侧向位移远大于 15 t 轴质量的有砟轨道。土工格室刚度越大,加固效果越好,但土工格室刚度超过 10 GPa 后,进一步提升对减小沉降的帮助不大;土工格室边长增加会减小加固效果,边长 100 mm 的壁厚相比 250 mm 减小了 16%的最终轨枕沉降。布置在有砟轨道的格室效果优于路基,且竖向位置不敏感,距轨枕近的效果稍好。双层格室加固效果更显著。

参考文献：

[1] 谢毅,寇峻瑜,姜梅,等. 中国铁路发展概况与技术展望[J]. 高速铁路技术,2020,11(1):11-16.

[2] 刘钢,罗强,张良,等. 高速铁路有砟轨道路基设计荷载分析[J]. 铁道科学与工程学报,2015(3):475-481.

[3] 巩琛. 高速铁路轨道：路基系统动力响应及影响参数的三维有限元分析[D]. 长春：吉林大学,2009.

[4] 董亮,蔡德钧,叶阳升,等. 列车循环荷载作用下高速铁路路基累积变形预测方法[J]. 土木工程学报,2010(6):100-108.

[5] 董亮,张千里,蔡德钧,等. 高速重载有砟轨道路基动变形特性的数值分析[J]. 中国铁道科学,2010,31(2):6-11.

[6] 董亮,赵成刚,蔡德钧,等. 高速铁路无砟轨道路基动力特性数值模拟和试验研究[J]. 土木工程学报,2008(10):81-86.

[7] 蒋红光,边学成,陈云敏,等. 高速铁路轨道-路基列车移动荷载模拟的全比尺加速加载试验[J]. 土木工程学报,2015(9):85-95.

[8] 徐鹏,蔡成标. 列车-有砟轨道-路基空间耦合动力学模型[J]. 工程力学,2011,28(3):191-197.

[9] ALSHAER A,DUHAMEL D,SAB K,*et al.* Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration,2008,316(1/2/3/4/5):211-233. DOI:10.1016/j.jsv.2008.02.055.

[10] 周顺华,王炳龙,宫全美. 土工格室加固基床的动应力传播原理[J]. 铁道学报,2003,25(1):96-98.

[11] 邓鹏,郭林,蔡袁强,等. 考虑填料 - 土工格室相互作用的加筋路堤力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(3):621-630.

[12] HEGDE A,SITHARAM T G. 3-dimensional numerical modelling of geocell reinforced sand beds[J]. Geotextiles and Geomembranes,2015,43(2):171-181. DOI:10.1016/j.geotexmem.2014.11.009.

[13] INDRARATNA B,BIABANI M M,NIMBALKAR S. Behavior of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading in plane-strain condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2014,141(1):642. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001199.

[14] LESHCHINSKY B,LING H. Effects of Geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2012,139(2):340-352. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000757.

[15] LESHCHINSKY B,LING H I. Numerical modeling of behavior of railway ballasted structure with geocell confinement[J]. Geotextiles and Geomembranes,2013,36(36):33-43. DOI:10.1016/j.geotexmem.2012.10.006.

[16] SATVAL S R,LESHCHINSKY B,HAN J,*et al.* Use of cellular confinement for improved railway performance on soft subgrades[J]. Geotextiles and Geomembranes,2018,46(2):190-205. DOI:10.1016/j.geotexmem.2017.11.006.

[17] 铁道第一勘察设计院. 铁路路基设计规范[M]. 北京：中国计划出版社,2010.

[18] SAAD B,MITRI H,POOROOSHASB H. 3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement [J]. Journal of Transportation Engineering,2006,132(5):402-415. DOI:10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:5(402).

[19] 陈震. 高速铁路路基动力响应研究[D]. 武汉：中国科学院研究生院,2006.

[20] 陈成,罗启天,杨超,等. 基于 DEM-MBD 耦合方法的路桥过渡段不均匀沉降研究[J]. 中国铁道科学,2022,43(3):69-77.

[21] 陈成,孙建,芮瑞,等. 基于有限元的土工格室加固有砟轨道沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(10):2427-2433.

（责任编辑：陈志贤      英文审校：方德平）