

# 列车荷载下桩网路基加筋垫层土工格栅 受力影响因素分析

魏 平<sup>1,2</sup>,魏 静<sup>1</sup>,肖 宏<sup>1</sup>,张 栋<sup>1</sup>

(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.北京工业职业技术学院 建筑与测绘工程学院,北京 100042)

**摘 要:**基于桩网路基动力有限元模型,分析了桩间距、路基高度、桩端土体模量、垫层模量对列车荷载作用下土工格栅受力的影响.研究表明:线路纵向方向上土工格栅的拉力随桩间距增加而增加,桩间距大于 2 m 对桩间土处格栅拉力影响较小,而对桩顶和边缘的格栅拉力影响较大;路基高度与土工格栅拉力基本呈正比关系;随桩端土体模量增大,土工格栅拉力减小,当桩端土体模量达到 100 MPa 时,格栅拉力基本不受影响,垫层模量变化对格栅拉力基本没有影响;列车荷载作用下的格栅拉力增量随路基高度增加而增加,随桩端土体模量增大而减小;沿路基横断面路基中心到坡脚的土工格栅拉力受桩间距、路基高度、桩端土体模量和垫层模量变化的影响与上述结论类似,但从路基中心到路肩再到坡脚,以上因素的影响程度逐渐降低.

**关键词:**列车荷载;桩网结构;路基;土工格栅;受力分析

**中图分类号:**TU435; U416.1      **文献标志码:**A

## Study on stress influential factors of geogrids of geosynthetic reinforcement layer in pile net subgrade structure under train load

WEI Ping<sup>1,2</sup>,WEI Jing<sup>1</sup>,XIAO Hong<sup>1</sup>,ZHANG Dong<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2.School of Civil Architecture and Surveying Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

**Abstract:**The influential factors of geogrid tension such as pile spacing, subgrade height, soil modulus of pile tip and geosynthetic reinforcement layer modulus under dynamic train load are studied based on the dynamic finite element model of pile net subgrade structure. The results show that the longitudinal geogrid tension increases with the increase of pile spacing. Besides, pile spacing has little effect on the geogrid tension in soil between piles when it reaches 2m or more, but it has great effect on the geogrid tension in the pile-top and at the edge. The value of geogrids tension is proportional to that of subgrade height. The value of geogrids tension decreases with the increase of soil modulus of pile tip, and the effect of the latter could be neglected when it reaches 100 MPa, which is little affected by the change of geosynthetic reinforcement

收稿日期:2017-03-24  
基金项目:北京市教育委员会科技计划(KM201410853004);北京工业职业技术学院科研重点项目(bgzyky 201701z)  
Foundation item: Project of Beijing Municipal Education Commission (KM201410853004); Key Project of Beijing Polytechnic College (bgzyky 201701z)  
第一作者:魏平(1977—),女,河北沧州人,副教授,博士生.研究方向为路基工程与岩土工程.email:610888065@qq.com.  
引用格式:魏平,魏静,肖宏,等.列车荷载下桩网路基加筋垫层土工格栅受力影响因素分析[J].北京交通大学学报,2017,41(3):77—83.  
WEI Ping,WEI Jing,XIAO Hong,et al. Study on stress influential factors of geogrids of geosynthetic reinforcement layer in pile net subgrade structure under train load[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3):77—83.(in Chinese)

layer modulus. The geogrid tension increment increases with the increase of subgrade height, but decreases with the increase of soil modulus of pile tip. For the geogrids distributed from the center to the edge of subgrade section, the effect of the above four influential factors to the geogrid tension have the same variation regularities , however, such effect become weaker at the road shoulder compared to the subgrade center, and the weakest at the slope toe.

**Keywords:** train load; pile net structure; subgrade; geogrid; stress analysis

为有效控制路基的沉降变形,保持高速铁路线路的稳定性和轨道结构的高平顺性,我国的高速铁路桩网结构路基多采用半刚性桩、刚性桩和由高强度土工合成材料组成的加筋垫层.在列车荷载作用下,桩网结构路基的桩(帽)-加筋垫层-土相互作用强烈,加筋垫层受力较为复杂,其力学性能对上部荷载的传递及桩土应力分担影响显著,是桩网结构路基功能实现的关键部件,也是桩网结构路基设计的关键技术.

目前已有不少学者开展了相关研究.Giroud 等<sup>[1]</sup>在 Terzaghi 理论的基础上,提出了应力重分布的表达式,给出了路堤荷载通过土拱作用后由水平加筋层承担的荷载大小的计算公式.Jones 等<sup>[2]</sup>根据 Terzaghi 的平面土拱效应计算模型,假定水平加筋体中的拉力由桩间土沉降和路堤边缘土体侧向位移引起,推导出水平加筋体中拉力的计算公式.后来, Giroud 等<sup>[3-4]</sup>对土工格栅的加筋作用进行了系列研究,提出了张拉薄膜理论.蔡德钧等<sup>[5]</sup>基于高速铁路桩网结构各单元间的协调工作机理,对加筋网垫承担的竖向静列车荷载及其引起的加筋体拉力、边坡推力效应引起的加筋体拉力等计算方法进行了研究.余缙等<sup>[6]</sup>、骆瑞萍等<sup>[7]</sup>、陈昌富等<sup>[8]</sup>及陈仁朋等<sup>[9]</sup>等主要根据张拉膜效应对土工格栅的受力进行分析,考虑了桩土差异沉降对土工格栅变形及受力的影响,部分学者考虑了土工格栅上下面的摩阻力.以上的研究主要是针对静载下土工格栅的受力情况,对于列车荷载作用下影响土工格栅的受力因素及规律还缺乏定性定量的研究.本文作者基于桩网结构路基动力有限元模型,研究了桩间距、路基高度、桩端土体模量、垫层模量对桩网结构路基沿线路纵向、路基横断面不同位置处的土工格栅受力的影响,得出了动载作用下这些因素对土工格栅受力的影响,从而对路基动荷载下的工作特性分析及路基结构设计和加筋垫层的选材起到参考作用.

1 桩网结构路基动力有限元模型

依据现场试验设计图纸及参数<sup>[10-13]</sup>,采用 ABAQUS 有限元软件,依据遂渝线无砟轨道现场

测试的某低路基断面尺寸及《高速铁路设计规范》<sup>[14]</sup>的相关规定,建立桩网结构路基动力有限元模型,如图 1 所示.其中的有限元模型尺寸依据现场试验尺寸而定,结构形式为单线板式无砟轨道,路基表面宽度取为 8.6 m,轨道板厚度为 0.2 m,宽度为 2.4 m.砂浆层厚度为 0.05 m,宽度为 2.4 m.支承层厚度为 0.3 m,宽度为 3.2 m.考虑到两相邻车辆前后转向架动力叠加的影响,路基模型纵向长度取 10 m.

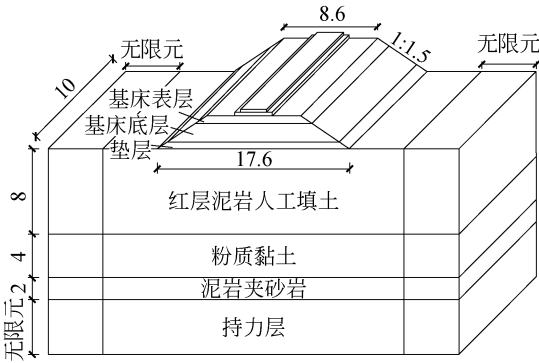


图 1 桩网路基有限元模型(单位:m)

Fig.1 Finite element model of pile net subgrade structure(unit:m)

在材料取值方面,将模型中轨道板、水泥乳化沥青砂浆、支承层、桩及桩帽视为线弹性材料,采用实体单元划分,单元类型为 C3D8R;将基床表层、基床底层、垫层、人工填土、粉质黏土及泥岩夹砂岩视为弹塑性材料,采用实体单元划分,单元类型为 C3D8R;将土工格栅视为弹性材料,其抗拉强度为 80 kN/m,厚度为 0.001 m,延伸率为 10%,纵横搭接均为 0.1 m,土工格栅采用膜单元划分,单元类型为 M3D4R.

鉴于本文的研究对象是路基,施加动荷载时主要考虑传递到路基中的中频轮轨力.对所加动荷载做以下假设:1)考虑行车速度和轴重;2)不考虑车辆的悬挂体系;3)不考虑轨道的不平顺性对轮轨力的影响.

$F(t)$  的表达式为

$$F(t)=\begin{cases} 0, & t\in(0+NT,\frac{L_1-L_2}{2V}+NT) \\ \left|kP_0(\frac{3}{4}\sin\omega_1t+\frac{2}{3}\sin\omega_2t)\right|, & t\in(\frac{L_1-L_2}{2V}+NT,\frac{L_1+L_2}{2V}+NT) \\ 0, & t\in(\frac{L_1-L_2}{2V}+NT,T+NT) \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_1=2\pi V/L_2 \quad (2)$$

$$\omega_2=2\pi V/L_3 \quad (3)$$

$$T=L_1/V \quad (4)$$

式中： $P_0$  为列车轮载； $L_1$  为单个车厢长度； $L_2$  为相邻车辆前后相邻转向架总长度； $L_3$  为相邻车厢前后相邻转向架间距； $T$  为动荷载周期； $t$  为时刻； $N$  为正整数， $V$  为行车速度； $k$  为移动荷载下扣件最大荷载分担系数，取值 0.45。根据上述假设，动荷载施加模拟为在轨道板上与扣件相应的位置施加变化力，模型可靠性验证参考本文作者前期的研究成果<sup>[15]</sup>。

路基横断面结构具有对称性，选取路基的右半幅模型进行分析，土工格栅布置平面图如图 2 所示。土工格栅主要位于沿线路纵向方向上的桩顶土上方、桩间土上方及路基横断面从路基中心到坡脚方向的桩顶土和桩间土上方。

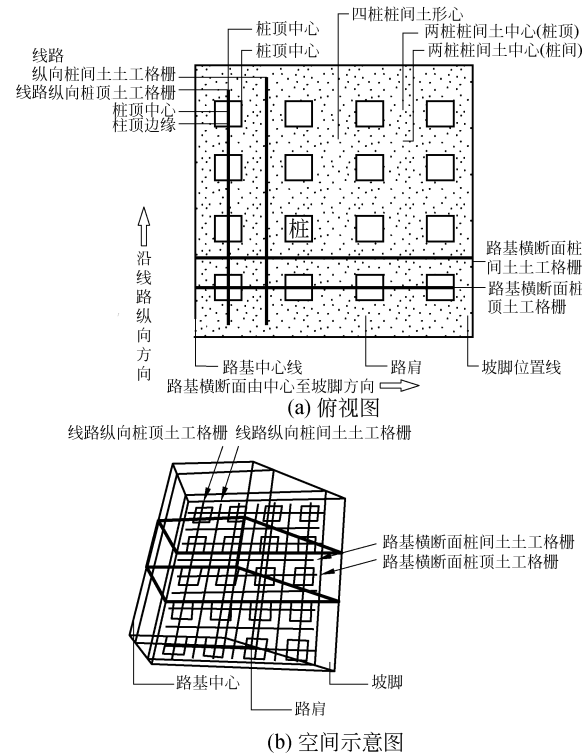


图 2 土工格栅在路基中的位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the geogrids in subgrade

## 2 土工格栅受力影响因素分析

### 2.1 桩间距对土工格栅受力的影响

沿线路纵向和路基横断面方向，静载作用下土工格栅拉力与桩间距的关系曲线分别见图 3 和图 4。

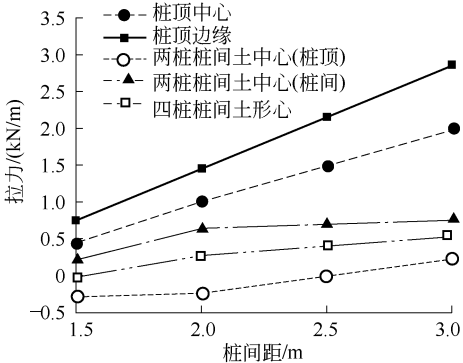


图 3 线路纵向土工格栅拉力与桩间距的关系

Fig.3 Correlation between the geogrid tension and pile spacing along railway line

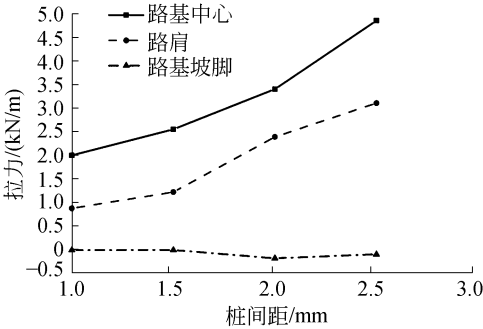


图 4 路基横断面土工格栅拉力与桩间距的关系

Fig.4 Correlation between the geogrid tension and pile spacing along subgrade section

图 3 表明，以桩顶中心为例，土工格栅的拉力值由 1.5 m 桩间距对应的 0.5 kN 增加到 2.5 m 桩间距对应的 1.4 kN，这是因为桩间距的增加导致了桩土差异沉降的增加，从而使土工格栅变形增加，拉力增大。桩间距较小时，两桩桩间土中心桩顶土工格栅表现出受压状态，而当桩间距增加时，土工格栅受压现象消失，因为桩间距增加导致桩间土荷载增加，需要土工格栅提供更多的张力参与平衡。不同位置土工格栅拉力随桩间距的变化表明，桩间距增到 2.0 m 后，桩顶中心及桩顶边缘的格栅拉力变化比

较显著,而其他位置格栅拉力受桩间距变化相对很小,说明此时格栅局部受力现象较明显,对其长期使用有不利影响。

图 4 表明,路基横断面的路基中心与路肩处的土工格栅拉力随桩间距的增加而增加,坡脚处格栅的拉力受桩间距变化影响小,因此,确定桩间距应重点考虑路基中心处的格栅强度及进行相应验证。

2.2 路基高度对土工格栅受力的影响

列车荷载作用前,沿线路纵向不同位置的土工格栅拉力与路基高度的关系曲线见图 5。列车荷载作用后,沿线路纵向格栅拉力增量与路基高度的关系见图 6。

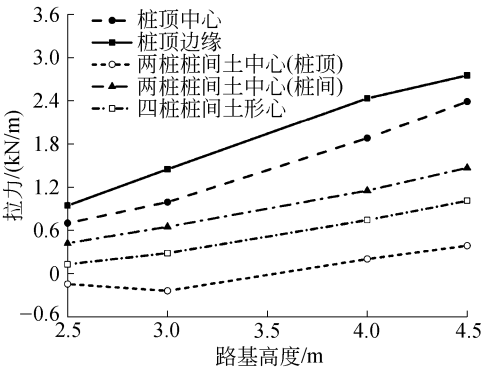


图 5 线路纵向土工格栅拉力与路基高度关系

Fig.5 Correlation between the geogrid tension and the subgrade height along railway line

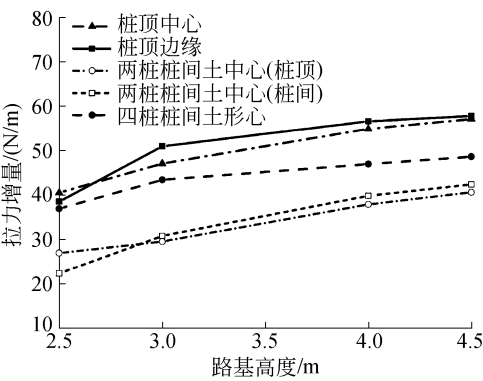


图 6 线路纵向土工格栅拉力增量与路基高度关系

Fig.6 Correlation between the geogrid tension increment and subgrade height along railway line

图 5 表明,随着路基高度增加土工格栅拉力值相应增加.这是因为随着路基高度的增加,桩间土荷载变大,桩土差异沉降变大,引起土工格栅变形增大,从而使其拉力变大.当路基高度小于 3 m 时,两桩桩间土中心处线路纵向桩顶土工格栅表现出受压状态.路基增高至 3.5 m 左右,格栅受压现象消失,这是因为路基高度增加导致桩间土荷载增加,土工格栅呈现拉力状态.比较不同位置土工格栅拉力与路基高度的相关性,桩顶中心及桩顶边缘土工格栅

拉力随路基高度的变化更加显著,因此路基高度增加使格栅拉力在桩顶边缘的应力集中现象明显。

图 6 表明,路基高度越大土工格栅上的动力越小,但格栅的拉力增量与路基高度呈正比关系,这是因为土工格栅拉力增量是列车荷载对格栅周围土体性状的改变而引起的。

路基横断面不同位置土工格栅受力与路基高度关系见图 7。列车荷载作用后的格栅拉力增量与路基高度的关系见图 8。

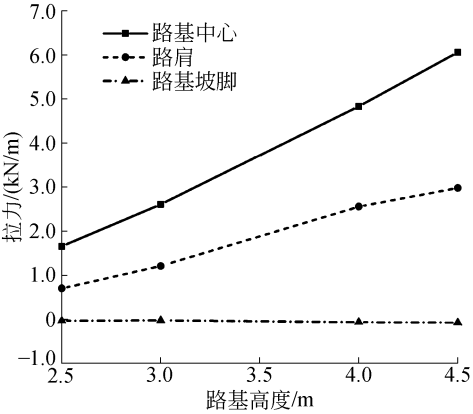


图 7 路基横断面土工格栅拉力与路基高度关系

Fig.7 Correlation between the geogrid tension and subgrade height along subgrade section

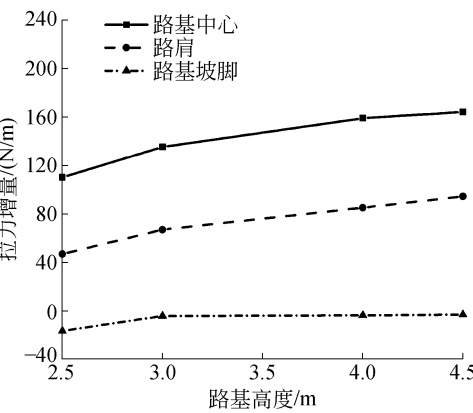


图 8 路基横断面格栅拉力增量与路基高度关系

Fig.8 Correlation between the geogrid tension increment and subgrade height along subgrade section

图 7 表明,路基中心与路肩处格栅拉力与路基高度呈正比关系,路基坡脚处土工格栅的拉力较稳定;路基高度对路基中心处土工格栅拉力影响最大,坡脚处土工格栅影响很小.图 8 表明,路基中心及路肩处的土工格栅的拉力增量随着路基高度增加而增加,坡脚处格栅的拉力增量变化幅度小.路基高度的增加使作用在格栅的动力减小,但列车荷载对土工格栅周围土体性状影响较大,从而导致格栅拉力增加,因此当设计的路基高度较高,对土工格栅的设计



要求应相应提高.

2.3 桩端土体模量对土工格栅受力的影响

列车荷载作用前的线路纵向不同位置土工格栅拉力与桩端土体模量的关系见图 9.列车荷载作用后的沿线路纵向土工格栅拉力增量与桩端土体模量的关系见图 10.

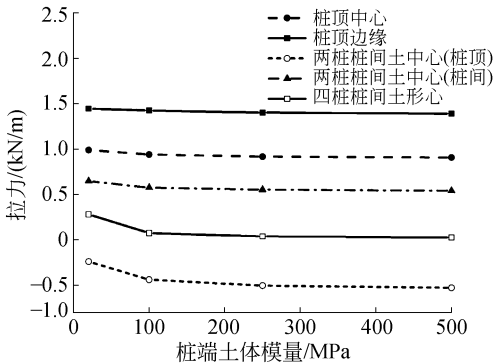


图 9 线路纵向土工格栅拉力与桩端土体模量关系

Fig.9 Correlation between geogrid tension and soil modulus of pile tip along railway line

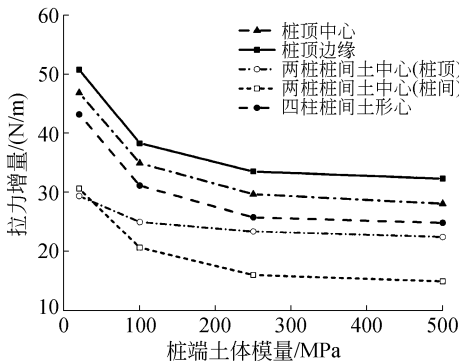


图 10 土工格栅拉力增量与桩端土体模量关系

Fig.10 Correlation between geogrid tension increment and soil modulus of pile tip along railway line

图 9 表明,随着桩端土体模量的增加土工格栅的拉力减小,当其达到 100 MPa 左右时,格栅拉力趋于稳定.图 10 表明,土工格栅拉力增量随桩端土体模量增加而逐渐减小,仅在桩端土体模量较小时对格栅拉力的增量影响较大.

列车荷载作用前路基横断面不同位置格栅受力与桩端土体模量关系见图 11.列车荷载作用下的格栅拉力增量与桩端土体模量的关系见图 12.可见,当桩端土体模量较小时,格栅受力与桩端土体模量呈反比,随着桩端土体模量增加,其对格栅受力的影响较小.路基中心处格栅拉力与桩端土体模量关系最大,到坡脚处格栅拉力基本不受桩端土体模量变化的影响.动荷载作用下,桩端土体模量达到一定值后,格栅拉力增量趋于稳定.路基中心和路肩处格栅的拉力增量随桩端土体模量的增加而减小,坡脚处

格栅拉力增量基本不受桩端土体模量影响.

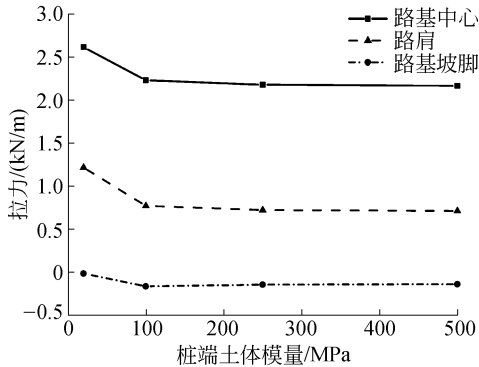


图 11 路基横断面格栅拉力与桩端土体模量关系

Fig.11 Correlation between geogrid tension and soil modulus of pile tip along subgrade section

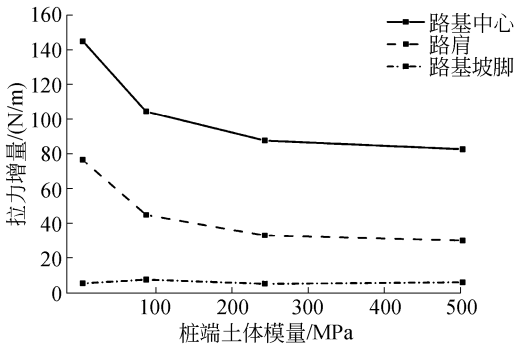


图 12 土工格栅拉力增量与桩端土体模量关系

Fig.12 Correlation between geogrid tension increment and soil modulus of pile tip along subgrade section

2.4 垫层模量对土工格栅受力的影响

列车荷载作用前后,线路纵向不同位置土工格栅拉力与垫层模量的关系见图 13 和图 14.

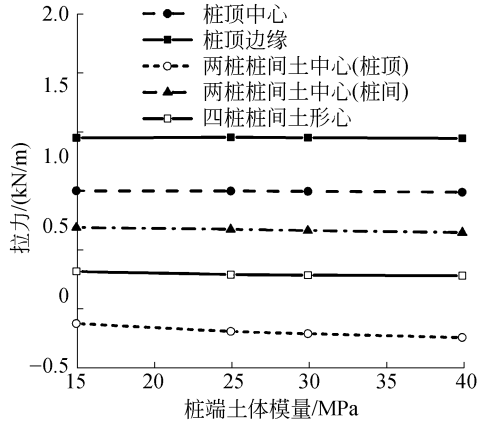


图 13 线路纵向格栅拉力与垫层模量关系

Fig.13 Correlation between geogrid tension and geosynthetic reinforcement layer modulus along railway line

可以看出,随着垫层模量的增大格栅的拉力微弱减小,垫层模量对纵向土工格栅拉力几乎没有影响.列车荷载作用后,桩顶边缘处、桩顶土及桩间土

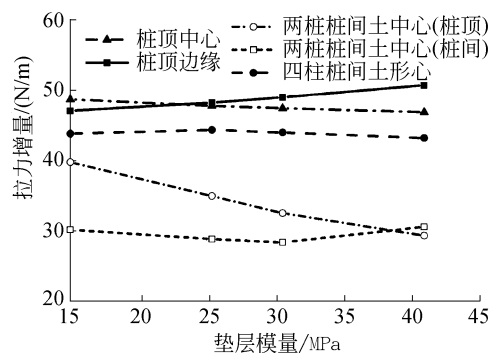


图 14 线路纵向格栅拉力增量与垫层模量关系  
Fig.14 Correlation between geogrid tension increment and geosynthetic reinforcement layer modulus along railway line

上方的格栅拉力增量略受垫层模量的影响,垫层模量在 15~40 MPa 之间变化,桩顶土的格栅拉力增量变化最大约为 10 N/m.

列车荷载作用前后路基横断面不同位置格栅受力及增量随垫层模量变化分布见图 15 和图 16.可见,路基中心、路肩及坡脚处土工格栅拉力和拉力增量均不受垫层模量的影响.

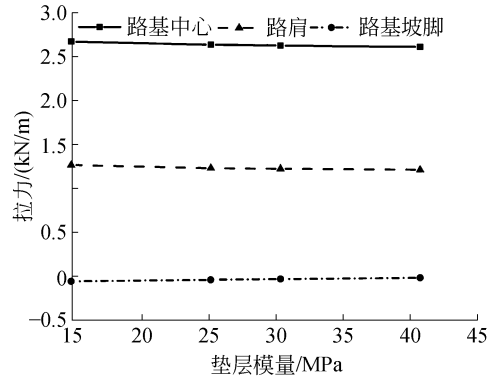


图 15 路基横断面格栅拉力增量与垫层模量关系  
Fig.15 Correlation between geogrid tension increment and geosynthetic reinforcement layer modulus along subgrade section

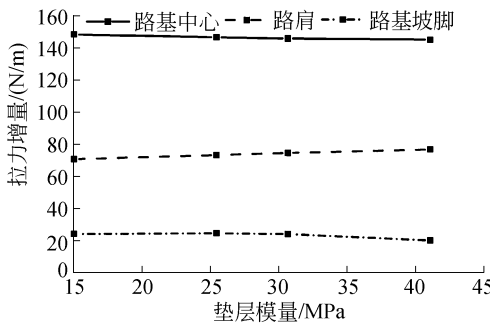


图 16 路基横断面格栅拉力与垫层模量关系  
Fig.16 Correlation between geogrid tension and geosynthetic reinforcement layer modulus along subgrade section

3 结论

1)沿线路纵向,土工格栅拉力随着桩间距增加而增加,当桩间距大于 2 m 后,其对桩顶中心和边缘的格栅拉力影响较大,而对桩间土处格栅拉力影响较小.土工格栅的拉力与路基高度呈正比,列车荷载作用后,纵向土工格栅拉力增量随路基高度增加而增加.

2)动荷载作用前后的线路纵向土工格栅拉力和拉力增量均随桩端土体模量的增大而减小,当该模量达到 100 MPa 左右,拉力和增量值受桩端模量的影响较小,此时可以忽略桩端土体模量的影响.垫层模量变化对格栅拉力基本没有影响,该模量取值在 15~40 MPa 间时仅对桩间土格栅拉力增量影响较大.

3)沿路基横断面路基中心到坡脚的土工格栅拉力受桩间距、路基高度、桩端土体模量和垫层模量变化的影响与上述结论类似,但从路基中心到路肩再到坡脚,这些因素的影响程度逐渐降低.

上述结论中,路基桩网结构中桩间距及路基高度的变化对加筋垫层土工格栅的影响较大,尤其是桩间距为 2 m,路基高度在 3 m 左右时,在路基结构设计中应重点考虑其取值,而桩端土体模量和垫层模量对土工格栅受力的影响相对较小,可以做次要考虑,上述成果对设计参数取值及选材具有一定的参考作用.

参考文献 (References):

[1] GIROUD J P, BONAPARTE R, BEECH J F, et al. Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1990, 9 (1):11-50.

[2] JONES C J F P, LAWSON C R, AYRES D J. Geotextile reinforced piled embankments[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles; Geomembranes and Related Products, Rotterdam, 1990: 155-160.

[3] GIROUD J P, HAN J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. Development of design method [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8): 775-786.

[4] GIROUD J P, HAN J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. II. Theoretical development [J]. Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering, 2004, 130(8): 787-797.

[5] 蔡德钧, 杨国涛, 叶阳升, 等. 高速铁路桩网结构加筋网垫受力计算方法 [J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5):1-5.

- CAI Degou, YANG Guotao, YE Yangsheng, et al. Calculation method for the mechanical force of reinforced bedding in the geosynthetics[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 1—5. (in Chinese)
- [6] 俞缙,周亦涛,鲍胜,等.柔性桩承式加筋路堤桩土应力比分析[J].岩土工程学报, 2011, 33(5): 705—713.  
YU Jin, ZHOU Yitao, BAO Sheng, et al. Pile-soil stress ratio of deformable pile-supported and geosynthetics-reinforced embankments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5), 705—713. (in Chinese)
- [7] 骆瑞萍,陈保国.桩承式加筋路堤作用机理理论与数值模拟[J].岩土工程技术, 2009, 23(3): 150—154.  
LUO Ruiping, CHEN Baoguo. Theoretical analysis and numerical simulation of embankment reinforced with geosynthetics and pile-wall [J]. Geotechnical Engineering, 2009, 23(3): 150—154. (in Chinese)
- [8] 陈昌富,周志军.桩承式多层水平加筋复合地基受力与变形分析[J].公路交通科技, 2009, 26(6): 29—34.  
CHEN Changfu, ZHOU Zhijun. Mechanical analysis on multi-layer horizontal reinforced and pile-supported composite ground[J]. Road Traffic Technology, 2009, 26(6): 29—34. (in Chinese)
- [9] 陈仁朋,徐正中,陈云敏.桩承式加筋路堤关键问题研究[J].中国公路学报, 2007, 20(2): 7—12.  
CHEN Renpeng, XU Zhengzhong, CHEN Yunmin. Research on key problems of pile-supported reinforced embankment[J]. China Journal of Highway, 2007, 20(2): 7—12. (in Chinese)
- [10] 詹永祥,蒋关鲁.桩板结构路基桩—土工作特性[J].交通运输工程学报, 2009, 9(4): 38—42.  
ZHAN Yongxiang, JIANG Guanlu. Pile-soil interaction properties of pile-plank embankment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 38—42. (in Chinese)
- [11] 肖宏,蒋关鲁,魏永幸.遂渝线无砟轨道桩网结构路基现场动车试验测试分析[J].铁道学报, 2010, 32(1): 79—84.  
XIAO Hong, JIANG Guanlu, WEI Yongxing. Dynamic test analysis on ballastless-track column-net structure subgrade of the Suining-Chongqing railway line[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 79—84. (in Chinese)
- [12] 李佳.遂渝铁路无砟轨道路隧过渡段实车测试及路基结构FEM计算[D].成都:西南交通大学, 2008.  
LI Jia. Field test of subgrade-tunnel transition section of ballastless track on Suining-Chongqing railway and subgrade structure FEM calculation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [13] 张栋.桩网结构低路基土拱效应及加筋垫层动力特性研究[D].北京:北京交通大学, 2015.  
ZHANG Dong. Study on soil arching effect and mechanical properties of cushion within geogrid reinforced pile supported low embankment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [14] 高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社, 2014.  
The standard of the design of high speed railway: TB 10621—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [15] 魏静,魏平,杨松林,等.列车荷载下的桩网结构低路基土拱效应[J].交通运输工程学报, 2015, 15(6): 35—44.  
WEI Jing, WEI Ping, YANG Songlin, et al. Soil arching effect of low subgrade with pile-net structure under train load[J]. Journal of Transportation Engineering, 2015, 15(6): 35—44. (in Chinese)