

# 考虑正交异性的粒料压实特性及其 结构力学行为研究

黄优<sup>1,2</sup>, 张允宝<sup>3\*</sup>, 刘朝晖<sup>2</sup>, 潘宇<sup>2</sup>, 刘泽斌<sup>2</sup>, 方荣海<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院,  
湖南 长沙 410114; 3.湖南省交通运输厅 交通建设造价管理站,湖南 长沙 410011)

**摘要:**粒料的正交异性与其压实过程密切相关,对路面的结构力学行为具有显著影响。为研究压实过程对粒料正交异性的影响,采用不同的压实方式及压实功对路用粒料进行击实成型,开展改进的动态回弹力学试验研究,得到典型粒料的正交异性系数 $\alpha^2$ ;采用有限元方法,开展考虑粒料正交异性的沥青路面结构力学分析。结果表明:对于旋转压实成型的试件,其干密度略大于冲击压实成型;增大压实功,在增加粒料干密度的同时也会增加其正交异性;在低压实功下,旋转压实成型的粒料正交异性更显著,但在高压实功下,冲击压实成型的正交异性更加显著;粒料的正交异性对沥青路面结构关键响应具有显著影响,忽略粒料的正交异性,存在低估路面结构损坏的风险;考虑粒料的正交异性,能够改善路面结构计算中粒料层的底部受拉,且更符合实际情况。

**关键词:**道路工程;粒料;正交异性;压实功;路面结构响应

中图分类号:U414

文献标志码:A

## Compaction Characteristics of Granular Material and its Structural Mechanical Behavior Considering Orthotropy

HUANG You<sup>1,2</sup>, ZHANG Yunbao<sup>3\*</sup>, LIU Zhaohui<sup>2</sup>, PAN Yu<sup>2</sup>, LIU Zebin<sup>2</sup>, FANG Ronghai<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Transportation Construction Cost Management Station, Department of Transportation of Hunan Province, Changsha, Hunan 410011, China)

**Abstract:** The orthotropy of granular materials is closely related to the compaction process and has a significant impact on the mechanical behavior of pavement structures. In this study, in order to study the effect of the compaction process on the orthotropy of granular materials, different compaction methods and compaction energies were employed to compact granular materials for pavement into specimens, and improved dynamic resilient mechanical tests were conducted. Orthotropic coefficients ( $\alpha^2$ ) of typical granular materials were obtained, and the finite element method was used to conduct mechanical analysis of asphalt pavement structures considering the orthotropy of granular materials. The results show that the dry density of specimens by gyratory compaction is slightly higher than that of specimens by impact compaction. Increasing compaction energy will increase the dry density and orthotropy of granular materials. Under low compaction energy, the orthotropy of granular materials by gyratory compaction is more significant, while under high compaction

收稿日期:2024-05-26(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52008044);湖南省交通运输厅科技创新计划项目(编号:202236);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(编号:kfj210401)

作者简介:黄优,男,博士,副教授.E-mail:hyzju@csust.edu.cn

\*通信作者:张允宝,男,博士,高级工程师.E-mail:690389581@qq.com

energy, the orthotropy of granular materials by impact compaction is more significant. The orthotropy of granular materials has a significant impact on the critical responses of asphalt pavement structures. Ignoring the orthotropy of granular materials will underestimate the risk of pavement structure damage. Moreover, considering the orthotropy of granular materials in pavement structure calculation can improve the tensile stress at the bottom of the granular material base and better reflect the actual situation.

**Keywords:** road engineering; granular material; orthotropy; compaction energy; pavement structure response

## 0 前言

粒料,也称为颗粒介质,是指大量散体的固体颗粒相互作用而组成的复杂体系,在自然界中普遍存在<sup>[1]</sup>。在道路工程领域,品质良好、级配合理的碎石是一种典型的粒料,经过机械摊铺、碾压后,由松散的“类流态”相变为密实的“类固态”,具有分散荷载、改善路基承载力、减少沉降差异、减振耗能、保温隔热以及排水抗冻等功能,可用于道路结构的基层、底基层以及路基的刚度补偿和模量过渡<sup>[2]</sup>;尤其对于寒冷季冻区、湿热多雨地区等特殊环境下道路结构设施的稳定性,意义重大。

与水泥或沥青稳定类材料不同,粒料作为一种颗粒材料,在力学性能上会表现出明显的应力依赖性和正交异性<sup>[2-7]</sup>。即粒料的动态回弹模量、泊松比会随应力状态的变化而发生变化,并且不同方向上的动态回弹模量与泊松比也有所不同。在含水率最佳的情况下,通过施加外力将符合一定粒径分布的松散颗粒进行压实,压实后形成的颗粒层具有较高的强度及较好的抗变形能力。而粒料的压实过程,实际上是颗粒在外力作用下迁移、翻转,形成颗粒间的接触和嵌锁,最终实现对力链的传递<sup>[8-9]</sup>。颗粒的宏观力学性能与其微观组构有着密切联系。Guo<sup>[10]</sup>通过大量试验证明了砂土的强度特性明显受到土体颗粒的影响;武启诚<sup>[11]</sup>研究了级配碎石无侧限抗压回弹模量影响因素,认为压实度和细集料颗粒对级配碎石回弹模量的影响最大;钱建固等<sup>[12]</sup>对土体各向异性的微观机理进行了分析,研究表明强度各向异性在本质上是微观组构各向异性的宏观表现;王建立等<sup>[13]</sup>研究了不同粗粒土颗粒接触特性对动应力衰减的影响,结果表明颗粒接触刚度越高,其内部应力传递越不均匀且衰减速度越慢;刘奉银等<sup>[14]</sup>采用三轴固结排水剪切试验,研究了不同的颗粒排列方式对砂土强度的影响,认为选取合适的相对密实度

与颗粒排列方式能够提高砂土整体强度。与此同时,颗粒在空间上的随机分布和排列造成了正交各向异性组构,颗粒排列越集中,各向异性越强<sup>[15]</sup>。而粒料主要是由较大的颗粒组成(如碎石、砾石),与砂质材料相比,表现出更加显著的各向异性。颗粒的分布和排列受外界荷载大小及荷载作用方式的影响,无论是室外压路机作业,还是室内压实试验,均以竖向作用为主。因此,颗粒在竖向的排列与水平方向的排列存在差异,造成粒料在竖向和水平向的动态回弹模量和泊松比存在一定差异。其中,压实方法及压实功是影响颗粒排列的两个最主要因素。不同压实方法及压实功条件下粒料的正交异性情况,有待深入研究。

正交异性和应力依赖性(非线性)是粒料两个最显著的力学特性,对粒料层的结构力学行为有较大影响。当前,主要关注粒料的应力依赖性及其对路面结构力学行为的影响<sup>[16-20]</sup>,而粒料正交异性的研究较少。Uzan<sup>[21]</sup>认为粒料的剪胀现象及粒料层内部的残余应力,受粒料正交异性的影响;Asadi等<sup>[22]</sup>通过将粒料的各向异性特征加入数值模拟,对沥青路面粒料基层的稳定性进行了分析,发现各向异性水平越高,粒料层的稳定性越差;Tutumluer等<sup>[23-24]</sup>对粒料的各向异性开展了试验研究,结果表明粒料层的竖向回弹模量约为水平向回弹模量的3倍,并认为沥青路面的结构力学分析应当充分考虑粒料层模量的各向异性;袁峻<sup>[25]</sup>针对粒料各向异性的试验方法与理论,分析了国内外研究成果,认为在计算时使用各向异性模型,能够更加准确地预测粒料层中的水平和竖向应变。因此,考虑粒料的正交异性,对准确表征粒料的材料力学特性和改善粒料层的结构力学分析至关重要。

本文采用旋转压实和冲击压实2种不同的压实方法及2个级别的压实功,对2种道路用粒料进行击实试验,研究不同压实方式和压实功下粒料的正交

异性,得到典型路用粒料的正交异性系数 $\alpha^2$ ;并开展相应的粒料基层沥青路面结构计算,分析粒料的正交异性对沥青路面结构力学行为的影响。研究成果可以为粒料的材料性能研究和粒料层结构力学分析提供参考。

1 原材料及击实试验

选用道路工程常用的碎石(石灰岩)和砾石,粒料的级配如表1所示。为研究压实方式的影响,试件成型方式分为冲击压实与旋转压实;为考察压实功的影响,每种压实方法分别设置了2个压实等级。

表1 粒料合成级配

Table 1 Synthetic gradation of granular materials

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
25	100.0	1.18	30.0
19	85.0	0.6	24.0
12.5	75.0	0.3	18.0
9.5	66.0	0.15	15.0
4.75	55.0	0.75	10.0
2.36	41.0		

旋转压实采用高300 mm、直径150 mm的圆柱体试件;压实参数为275 kPa的接触压力、倾角为3°,旋转速度为30 r/min,压实时间为60 s<sup>[26]</sup>。冲击压实参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)的T0131<sup>[27]</sup>。冲击压实使用4.5 kg落锤从45 cm高度自由落下,试件按每层50 mm的厚度进行分层击实,每层进行50次锤击,以确保达到理想的压实效果。为研究不同压实功对粒料各向异性的影响,2种压实方式都设置了低压实功对照组:旋转压实的接触压力为137 kPa、倾角为3°,压实时间为45 s;冲击压实的压实次数降低至每50 mm进行25次,其余压实条件保持不变。

2 不同压实方法及压实功

为研究压实方式和压实功对粒料正交异性的影响,采用2种成型方式、2个压实等级进行试验,并测定了不同试验条件下成型试件的含水率与干密度,具体结果如表2所示。

由表2可知:随着压实功的增加,试件的干密度均有所增加;由于旋转压实的搓揉效果,成型的试件干密度略大于冲击压实成型的试件。黄优等<sup>[2]</sup>针对

表2 试件成型的含水率和干密度

Table 2 Moisture content and dry density of specimen

压实类型	压实等级	碎石		砾石	
		含水率/%	干密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含水率/%	干密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
冲击压	低压实功	5.0	2 130	4.5	2 305
实成型	高压实功	5.0	2 170	4.5	2 400
旋转压	低压实功	4.5	2 185	4.0	2 370
实成型	高压实功	4.5	2 210	4.0	2 385

粒料的应力依赖性和正交异性开展了室内试验研究,提出了改进的动态三轴试验方法,能够同时获取粒料竖向和水平向的动态回弹力学参数,包括回弹模量和泊松比。对成型的试件开展改进的动态回弹模量试验,并回归了文献[2]中动态回弹力学的Uzan三参数模型系数 $k_1\sim k_9$ ,如式(1)~(3)所示。计算了竖直方向和水平方向的泊松比 $\nu_{vh}$ 和 $\nu_{hh}$ ,具体数值如表3所示。

$$E_v = k_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$$

(1)

$$\nu_{vh} = k_4 \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_5} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_6}$$

(2)

$$1/A = k_7 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_8} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_9}$$

(3)

式中: $\theta$ 为体应力; $\tau_{oct}$ 为八面体剪切应力; $P_a$ 为标准大气压; $k_1\sim k_9$ 为回归系数; $E_v$ 为竖向动态回弹模量; $\nu_{vh}$ 为竖直平面内的泊松比; $A=(1-\alpha\nu_{vh})/(\alpha^2 E_v)$ 。

$\alpha$ 为水平刚度与竖向刚度的比值,且满足 $\alpha^2=E_{hh}/E_{vh}$ 和 $\alpha=\nu_{hh}/\nu_{vh}$ <sup>[2,28]</sup>。粒料的正交异性程度可用正交异性系数 $\alpha^2$ 表征,提取了3个不同应力水平下碎石和砾石的竖向和水平向模量值,并计算了正交异性系数 $\alpha^2$ ,见图1、2。3个应力状态如表4所示。

总体上,两种击实方式成型的碎石和砾石的竖向回弹模量 $E_{vh}$ 值均大于水平向回弹模量 $E_{hh}$ 值,即两种压实方式下成型的粒料均呈现出明显的正交异性。本研究中所用的粒料正交异性系数为0.41~0.75。随着压实功的增加,粒料的正交异性系数 $\alpha^2$ 逐渐减小,说明正交异性程度随压实功的增大而逐渐增加。以石灰岩碎石为例,相比低压实功,旋转压实成型时,高压实功成型的试件正交异性系数 $\alpha^2$ 降低了15%~28%;冲击压实时,正交异性系数 $\alpha^2$ 降低了7%~17%。这是因为增加压实功,虽然粒料在竖直

表 3 粒料的动态回弹力学参数

Table 3 Dynamic resilient mechanical parameters of granular materials

材料类型	压实类型	压实功类型	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$\nu_{vh}$	$\nu_{hh}$
碎石	旋转压实	低压实功	4 530	0.256	0.133	265	1.252	-0.023	365	0.893	0.024	0.19	0.41
		高压实功	5 083	0.240	0.097	784	0.961	-0.042	689	0.733	-0.003	0.18	0.40
	冲击压实	低压实功	3 110	0.311	0.123	443	1.051	0.018	448	0.783	0.040	0.15	0.30
		高压实功	4 661	0.342	0.082	637	1.065	-0.061	633	0.811	-0.011	0.19	0.41
砾石	旋转压实	低压实功	4 724	0.217	0.137	355	1.241	-0.056	498	0.797	0.018	0.16	0.30
		高压实功	4 059	0.268	0.060	994	0.558	-0.030	752	0.521	-0.005	0.17	0.39
	冲击压实	低压实功	2 551	0.325	0.070	1 190	0.635	-0.086	692	0.551	-0.012	0.17	0.35
		高压实功	3 734	0.221	0.104	836	0.794	-0.081	691	0.591	-0.004	0.16	0.34

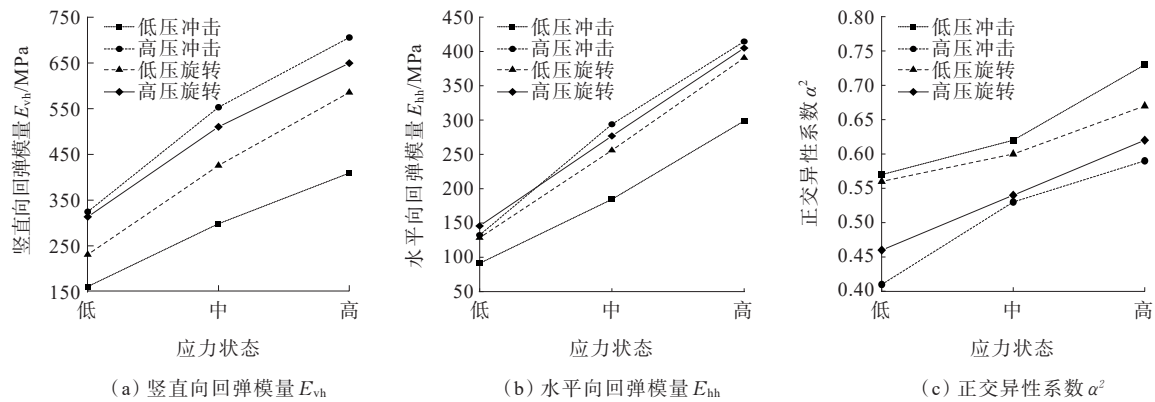


图 1 不同应力水平下碎石的动态回弹模量及正交异性

Figure 1 Dynamic resilient modulus and orthotropy of gravels at different stress levels

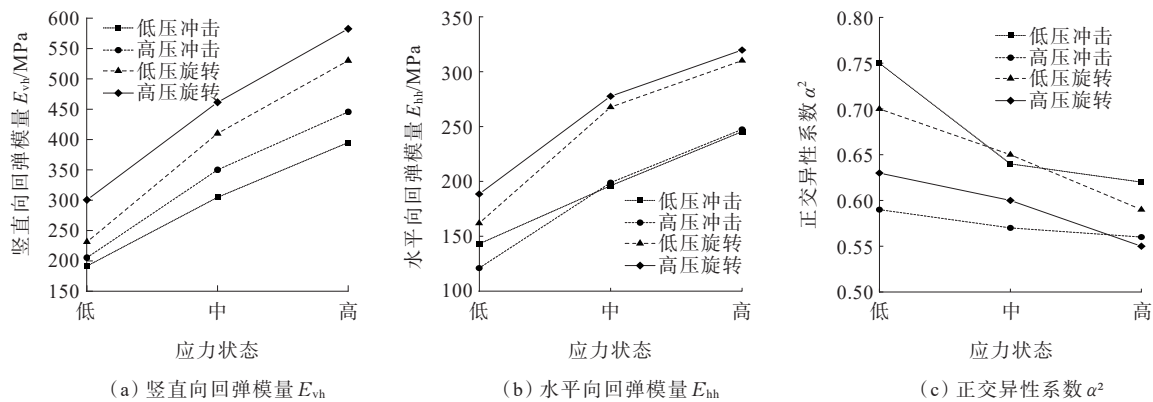


图 2 不同应力水平下砾石的动态回弹模量及其正交异性

Figure 2 Dynamic resilient modulus and orthotropy of gravels at different stress levels

表 4 粒料的应力状态

Table 4 Stress state of granular materials

应力水平	围压/kPa	偏应力/kPa
低	40	30
中	100	70
高	120	130

向和水平方向上的动态回弹模量均会增加,但是竖直向(与外力作用方向一致)的回弹模量增加的幅度更大。不同压实方法之间,粒料的正交异性也存在差别,且这种差别受压实功的影响:在低压实功下,与冲击压实成型相比,旋转压实成型的 $\alpha^2$ 值更小;但是在高压实功下,冲击压实成型的粒料 $\alpha^2$ 值更小。因



此,粒料的正交异性受到压实方式与压实功的共同作用影响,当压实组合为“冲击压实+高压实功”时,粒料具有最大的正交异性。此外,粒料自身的性质也会对其正交异性造成影响,成型方式相同时,石灰岩碎石的正交异性程度随着应力水平的增大而减小;砾石的正交异性程度则随着测试时应力水平的增加而略有增加。这主要是因为与砾石相比,石灰岩碎石颗粒的棱角更多,表面更加粗糙,因此颗粒间的嵌挤作用更加明显;并且随着应力水平的增加,这种嵌挤作用更强,造成颗粒间的应力传递更为有效、均衡,因此碎石的正交异性有所降低。

3 考虑正交异性的粒料层结构力学分析

为了分析粒料的正交异性对路面结构力学性能的影响,开展考虑粒料正交异性的沥青路面结构有限元计算,路面结构选用美国长期路面性能计划LTTP(Long Term Pavement Program)中“沥青面层+粒料基层+路基”的典型柔性基层沥青路面。粒料和土基材料的动态回弹模量通过室内试验获得,并拟合了三参数动态回弹模量 $k_1 \sim k_3$ ,由于上部土

基(厚约600 mm)的含水率与下部土基的含水率之间存在差异,因此对上部土基的动态回弹模量模型参数 $k_1$ 进行了湿度调整,具体的有限元建模与验证及湿度调整方法见文献[14]。为了考虑不同工况组合的影响,在原有LTTP路面结构和材料的基础上,对路面结构组合、材料参数及荷载情况进行了调整:

(1) 在原沥青面层厚度10 cm基础上,增加了薄沥青面层的工况(厚度5 cm)。

(2) 由于研究的重点为粒料,因此沥青混合料模量根据经验取值。考虑沥青面层模量的影响,考察了4个沥青面层模量水平(2 000 MPa、4 000 MPa、8 000 MPa、15 000 MPa)。

(3) 为考察荷载水平的影响,设置了2个荷载水平(普通沥青面层路面结构的荷载水平分为0.7 MPa和1.2 MPa,薄沥青层路面结构的荷载水平分为0.7 MPa和1.0 MPa)。

(4) 根据上述粒料击实试验的正交异性情况,设置了4个正交异性系数( $\alpha^2=1.0、0.7、0.5、0.3$ )。

共计64个算例,具体的路面结构组合及材料参数如表5所示。

表5 路面结构与材料参数  
Table 5 Pavement structure and material parameters

结构	厚度/cm	材料参数		竖平面内Uzan通用模型参数			正交异性系数 $\alpha^2$
		模量值/MPa	泊松比	$k_1$	$k_2$	$k_3$	
HMA上面层	10/5	2 000/4 000/8 000/15 000	0.25				
基层(碎石)	30		0.35	1 415	0.72	0.00	1.0/0.7/0.5/0.3
土基上部(黏质砂土)	60		0.40	1 233	0.51	−0.22	1.0/0.7/0.5/0.3

考察了粒料基层沥青路面结构关键响应,包括沥青面层底部最大拉应变和土基顶部最大竖向变形。以“10 cm沥青面层+1.0 MPa荷载”的路面结构为例,其路面结构关键响应随正交异性程度的变化如图3、4所示,其他工况下的变化规律一致。试验结果表明:路面结构响应与正交异性程度呈正相关,当 $\alpha^2=0.5$ 时,沥青面层底部拉应变增加了9%~28%,土基顶部竖向变形增加了35%~39%;当 $\alpha^2=0.3$ 时,沥青面层底部拉应变增加了15%~45%,土基顶部竖向变形增加了70%~85%。沥青面层的模量越小,粒料的正交异性对路面关键结构响应的影响越明显:沥青面层模量为2 000 MPa时,考虑粒料的正交异性造成沥青面层层底拉应变增加10%~45%,土基顶部竖向变形增加了45%~85%;沥青面层模量

为15 000 MPa时,考虑粒料的正交异性造成沥青面层层底拉应变增加5%~15%,土基顶部竖向变形增加

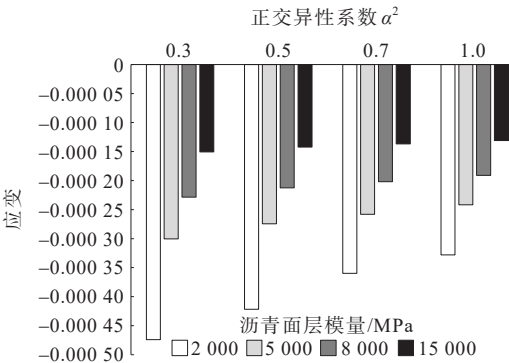


图3 沥青面层底部最大拉应变随正交异性的变化  
Figure 3 Variation of maximum tensile strain at the bottom of asphalt layer with orthotropy

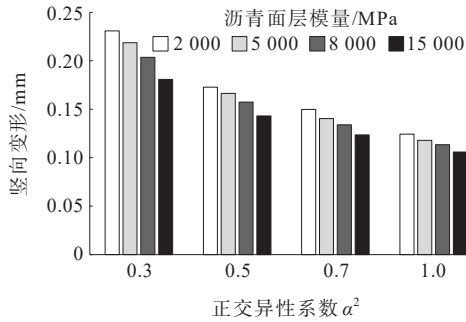


图4 土基顶部最大竖向变形随正交异性的变化

Figure 4 Variation of maximum vertical deformation at the top of soil base with orthotropy

了16%~60%。可见,现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)<sup>[29]</sup>,没有考虑材料的正交异性,得到的结构响应可能小于实际路面结构响应,存在低估结构损坏的风险。

有研究表明,在基于层状弹性体系的路面结构计算中,粒料层底部常处于受拉状态<sup>[19,22]</sup>,这显然是不合理的。因此,进一步考察粒料正交异性程度对粒料层力学响应的影响。图5~8列举了不同路面结构组合+荷载的粒料基层底部水平应力。图中应力值的正负代表拉压状态,正应力值代表受压,负应力值代表受拉。结果表明,不同的路面结构+荷载的组合中,均出现了粒料基层底部受拉的情况,且沥青面层的模量越小、荷载水平越高,粒料层底部受拉情况越明显。而随着正交异性程度增加( $\alpha^2$ 逐渐减小),粒料基层底部的拉应力不断减小。在部分算例中,粒料层底部实现了“由受拉到受压的转变”(如图5中,沥青面层模量为15 000 MPa;图7中,沥青面层模量为2 000 MPa;图8中,沥青面层模量为8 000 MPa);而在粒料基层受压的算例中,随着正交异性程度的增加,粒料层底部的压应力不断增加(如图7中,沥青面

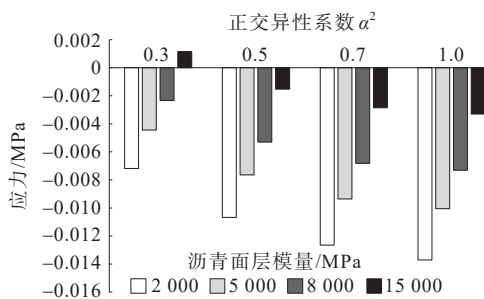


图5 5 cm 沥青面层+0.7 MPa 荷载粒料基层底部水平应力

Figure 5 Horizontal stress at the bottom of granular material base with 5 cm asphalt layer + 0.7 MPa load

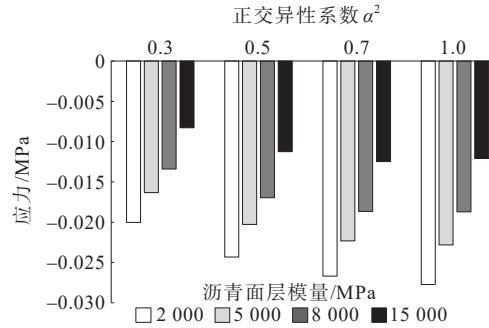


图6 5 cm 沥青面层+1.0 MPa 荷载的粒料基层底部水平应力

Figure 6 Horizontal stress at the bottom of granular material base with 5 cm asphalt layer + 1.0 MPa load

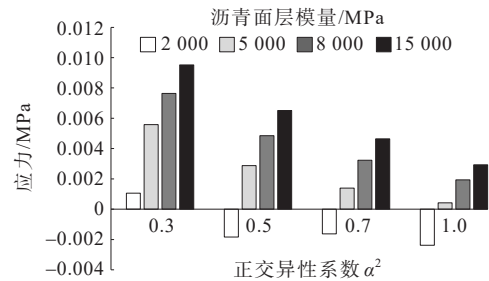


图7 10 cm 沥青面层+0.7 MPa 荷载的粒料基层底部水平应力

Figure 7 Horizontal stress at the bottom of granular material base with 10 cm asphalt layer + 0.7 MPa load

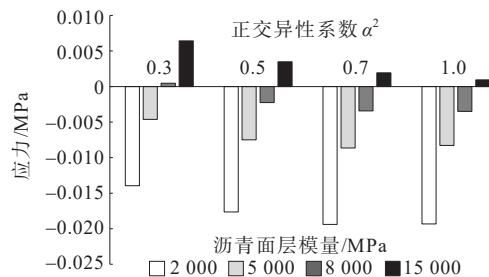


图8 10 cm 沥青面层+1.2 MPa 荷载粒料基层底部水平应力

Figure 8 Horizontal stress at the bottom of granular material base with 10 cm asphalt layer + 1.2 MPa load

层模量为5 000 MPa、8 000 MPa和15 000 MPa)。可见,考虑基层粒料的正交异性,能够改善粒料层的力学计算结果,更加符合实际情况。

## 4 结论

本文研究了不同压实方式和压实功下粒料的正交异性特性,并开展了考虑粒料不同正交异性的柔性基层沥青路面结构计算。主要结论如下:

(1) 由于颗粒的空间排列特性,粒料的正交异性普遍存在,在压实方式和压实功的共同作用下,对粒料的正交异性产生了影响,同时粒料正交异性也受

其自身性质的影响。

(2) 增加压实功在增加试件压实度的同时,也增大了粒料的正交异性程度;在低压实功下,旋转压实成型的粒料表现出较强的正交异性;而高压实功会导致冲击压实成型的粒料表现出较高的正交异性。“冲击+高压实功”的压实组合成型的粒料正交异性最大。

(3) 粒料的正交异性对沥青路面结构关键响应有着显著影响,当粒料的正交异性 $\alpha^2=0.5$ 时,沥青面层底部拉应变增加了9%~28%,土基顶部竖向变形增加了35%~39%,忽略粒料的正交异性,存在低估路面结构损坏的风险。

(4) 路面结构力学计算中,随着粒料正交异性的增加,粒料层底部计算得到的拉应力不断减小,并能够实现由受拉到受压的转变,在进行粒料基层结构力学计算时,应当考虑粒料的正交异性,使计算结果更符合实际情况。

(5) 开展考虑路面材料正交异性的非线性路面结构力学研究,是未来道路结构力学和路面结构设计的发展方向。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 孙其诚.颗粒介质的结构及热力学[J].物理学报,2015,64(7):267-277.  
SUN Qicheng. Granular structure and the nonequilibrium thermodynamics[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(7): 267-277.
- [2] 黄优,刘朝晖,李盛,等.粒料的正交异性非线性回弹特性研究[J].中国公路学报,2020,33(11):148-157.  
HUANG You, LIU Zhaohui, LI Sheng, et al. Research on cross-anisotropic nonlinear resilient characteristics of granular material[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 148-157.
- [3] HICKS R G. Factors influencing the resilient properties of granular materials[D]. Berkeley: University of California, 1970.
- [4] ALLEN J J, THOMPSON M. Resilient response of granular materials subjected to time-dependent lateral stresses[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1974, 510: 1-13.
- [5] 金海兵,易子程,卓荣.西非砾质红土粒料掺砂改良及水

- 泥稳定处置研究[J].中外公路,2024,44(2):282-288.  
JIN Haibing, YI Zicheng, ZHUO Rong. Improvement of gravelly laterite and cement stable disposal in West Africa [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 282-288.
- [6] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art I: Resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(1): 66-75.
- [7] UZAN J. Characterization of granular material [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1985, 1022: 52-59.
- [8] 郑虎,牛文清,毛无卫,等.颗粒物质力学及其在工程地质领域中的应用初探[J].工程地质学报,2021,29(1): 12-24.  
ZHENG Hu, NIU Wenqing, MAO Wuwei, et al. Mechanics of granular material and the application in engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 12-24.
- [9] 杜清馨,孙其诚,丁红胜,等.垂直振动下干湿颗粒样品的体积模量与耗散[J].物理学报,2022,71(18):173-180.  
DU Qingxin, SUN Qicheng, DING Hongsheng, et al. Experimental study on bulk modulus and dissipation of dry and wet granular samples under vertical vibration[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(18): 173-180.
- [10] GUO P J. Modified direct shear test for anisotropic strength of sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(9): 1311-1318.
- [11] 武启诚.级配碎石无侧限抗压回弹模量影响因素分析[J].中外公路,2014,34(2): 283-287.  
WU Qicheng. Analysis on influencing factors of unconfined compressive resilience modulus of graded macadam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(2): 283-287.
- [12] 钱建固,黄茂松.土体塑性各向异性的微宏观机理分析[J].岩土力学,2011,32(增刊2): 88-93.  
QIAN Jiangu, HUANG Maosong. Micro-macro mechanism analysis of plastic anisotropy in soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(sup 2): 88-93.
- [13] 王建立,蒲阳,杨晓明,等.粗粒土颗粒接触特性对路基动应力衰减影响研究[J].中外公路,2022,42(1): 19-22.  
WANG Jianli, PU Yang, YANG Xiaoming, et al. Study on influence of particle contact characteristics on dynamic stress attenuation of coarse-grained soil subgrade[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 19-22.
- [14] 刘奉银,钟丽佳,仲玥.不同颗粒排列对砂土力学特性的影响研究[J].岩土工程学报,2021,43(增刊1): 155-160.

- LIU Fengyin, ZHONG Lijia, ZHONG Yue. Effects of different particle arrangements on mechanical properties of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(sup 1): 155-160.
- [15] 李学丰, 王奇, 刘金峰, 等. 考虑砂土颗粒形状的细观组构定量描述[J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 29-36, 53.
- LI Xuefeng, WANG Qi, LIU Jinfeng, et al. Quantitative description of microscopic fabric based on sand particle shapes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 29-36, 53.
- [16] 黄优, 王帅, 刘朝晖, 等. 粒料层当量模量求解新方法: 以粒料基层沥青路面为例[J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 97-106.
- HUANG You, WANG Shuai, LIU Zhaohui, et al. Method for determining equivalent modulus of granular layer: A case study of asphalt pavement with granular base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 97-106.
- [17] 黄优, 刘朝晖, 柳力, 等. 沥青路面结构粒料层非线性行为研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 665-676.
- HUANG You, LIU ZhaoHui, LIU Li, et al. Nonlinear behavior of unbound granular layer in asphalt pavement structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2): 665-676.
- [18] KIM M, TUTUMLUER E, KWON J. Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, 9(5): 195-208.
- [19] WANG H, AL-QADI I L. Importance of nonlinear anisotropic modeling of granular base for predicting maximum viscoelastic pavement responses under moving vehicular loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(1): 29-38.
- [20] 凌天清, 王士杰, 许志鸿. 考虑材料非线性性能的沥青路面位移与应力分析[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 3-8.
- LING Tianqing, WANG Shijie, XU Zhihong. Study of nonlinear analysis of flexible pavements[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 3-8.
- [21] UZAN J. Resilient characterization of pavement materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(6): 453-459.
- [22] ASADI M, ASHTIANI R S. Stability analysis of anisotropic granular base layers in flexible pavements[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 14: 183-189.
- [23] TUTUMLUER E. Predicting behavior of flexible pavements with granular bases[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1995.
- [24] TUTUMLUER E, THOMPSON M R. Anisotropic modeling of granular bases in flexible pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1997, 1577(1): 18-26.
- [25] 袁峻. 无粘结集料各向异性的试验方法和理论研究[J]. 中外公路, 2003, 23(6): 55-58.
- YUAN Jun. Experimental method and theoretical study on anisotropy of unbonded aggregate[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(6): 55-58.
- [26] AASHTO. Moisture -density relations of soils using a 4.54 kg rammer and a 457 mm Drop: T180-15[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2015.
- [27] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [28] GRAHAM J, HOULSBY G T. Anisotropic elasticity of a natural clay[J]. Géotechnique, 1983, 33(2): 165-180.
- [29] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- CCCC Road and Bridge Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.