

《路基工程·耐久性路基》专栏

[编者按]随着我国经济建设的快速发展,道路实际交通量迅速超过预期,道路结构使用寿命远低于设计寿命。加之我国路面设计寿命原本就低于发达国家,使得道路结构较短的服役寿命和经济社会对其高品质的服务水平需求之间的矛盾愈突出。因此,提高我国公路基础设施的服役寿命,是使其更好地服务于国民经济发展、建设交通强国的一项战略举措。

针对道路结构性能衰减过快的问题,我国曾开展了一些“耐久性路面建造”方面的研究,并取得了丰硕成果,然而,由于路基工程病害具有隐蔽性等特点,长期以来道路工程研究一直存在“重路面、轻路基”的现象,导致对路基性能演变及调控方面的研究滞后。

为此,本刊推出《路基工程·耐久性路基》专栏。本期专栏的4篇文章分别从“级配碎石力学性能”“级配碎石各向异性”“生活垃圾焚烧炉渣路基力学特性”“粗粒土持水特性”等方面研究了路基的耐久性。

专栏主编简介:

张军辉,长沙理工大学交通运输工程学院院长,教授,“十四五”国家重点研发计划项目首席科学家,国家杰出青年科学基金获得者。主要从事耐久性路基设计理论与方法、特殊土路基稳定与加固、建筑固废资源化利用、路基改扩建工程关键技术等方面的教学科研与工程创新应用等工作。主持国家重点研发计划项目等国家和省部级项目近10项,在知名期刊发表学术论文130余篇,主编规范2部,出版学术专著4部,授权发明专利50余项。获国家科技进步二等奖1项,省部级科技进步一等奖4项、二等奖3项、三等奖1项。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220812001

文章编号:1672-9331(2023)01-0001-15

引用格式:王绪丰,张军辉,李岷,等.路用级配碎石力学性能研究进展与展望[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):1-15.

Citation: WANG Xufeng, ZHANG Junhui, LI Jue, et al. Review and prospect of research on mechanical properties of unbound aggregates[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(1): 1-15.

路用级配碎石力学性能研究进展与展望

王绪丰¹, 张军辉¹, 李岷², 张安顺¹, 刘绍平¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114;2.重庆交通大学 交通运输学院,重庆 400074)

摘要:级配碎石在道路工程中应用广泛,为全面了解路用级配碎石的力学特性,基于国内外研究开展级配碎石力学性能研究综述。首先,介绍了路用级配碎石变形性能研究现状,包括剪切变形、动态回弹模量、永久变形;其次,从试验测试方法、演变规律表征两个方面对级配碎石各向异性行为进行了总结分析;最后,对级配碎石力学行为的重要影响因素进行归纳,从集料物理性质、粒料结构特征和外部应力状态三个方面进行了综述。分析表明:碎石材料的力学性能与颗粒性质、结构特征和应力状态密切相关,并具有显著的各向异性特征。未来可从级配碎石回弹模量计算方法、性能各向异性参数计算方法、动应力响应分析等方面开展进一步研究。

关键词:道路工程;级配碎石;力学性能;变形性能;各向异性

中图分类号:U416

文献标志码:A

0 引言

在交通荷载作用下,半刚性沥青路面结构易

发生反射裂缝和水损害等病害,导致路用性能急剧衰减,使用寿命偏低^[1-3]。已有研究表明,以级配碎石为代表的粒料基层对反射裂缝和冻胀翻浆具有较好的预防作用^[4]。我国现行《公路沥青路

收稿日期:2022-08-12;修回日期:2022-09-09;接受日期:2022-09-14

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(52025085);湖南重点研发计划(2022SK2083);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2021SS06)

通信作者:张军辉(1978—)(ORCID:0000-0003-4199-4884),男,教授,主要从事特殊路基设计与处治方面的研究。

E-mail:zjhseu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

面设计规范》(JTG D50—2017)指出,路基湿度状态为中湿或潮湿时,宜设置级配碎石等粒料类路基改善层,以增强路基结构的刚度和抗湿化变形能力,从而提高路面整体的力学性能^[5]。然而,由于级配碎石级配较为均匀、颗粒间接触面积相对较小,在荷载应力和环境因素共同作用下易发生颗粒破碎与粉化,引起碎石级配劣化、力学性质衰减,其抵抗变形能力随之降低^[6]。若选用工程性能较差的碎石材料,将导致道路结构的使用寿命衰减并危害行车安全。因此,基于道路工程稳定性与耐久性的战略目标,科学评价级配碎石的力学性能具有重要意义。

近些年来,越来越多的研究发现级配碎石材料的颗粒性结构特征和非线性力学特性,这与层状弹性体系理论所假定的均质的、连续的、均匀的、各向同性的线弹性材料差异显著^[7-9]。然而,由于碎石内部的细观作用机理复杂,颗粒之间的接触行为难以采用传统试验进行观测。计算机和图像识别技术的发展为级配碎石力学性能的系统研究提供了契机^[10-11]。因此,有必要对级配碎石的力学性能进行总结以深入理解级配碎石细观结构力学响应的作用机制,并结合先进的仪器设备和技术手段提出合理的解决途径。

鉴于此,本文选取级配碎石的变形性能、各向异性行为、力学性能主要影响因素等作为对象开展综述,以期对级配碎石柔性基层和路基改善层的设计指标和设计方法研究提供参考。

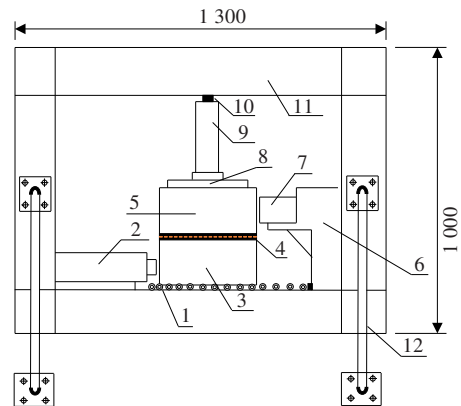
1 级配碎石的变形性能评价研究现状

目前,已有研究多根据级配碎石所受到的不同荷载类型,以静态、动态荷载为两条主线对其变形性能开展研究。对于静态荷载而言,剪切变形是相关人员最为关注的研究内容,而动态荷载作用下最为重要的变形特性则是回弹变形与永久变形。相对应的,三轴剪切试验与动三轴试验是考察两类荷载作用下级配碎石变形性能的主要手段。

1.1 级配碎石剪切变形

由于级配碎石粒径范围较大,因而大型直接剪切试验及三轴剪切试验等室内试验是研究其剪切变形的最主要手段。邢心魁等^[12]提出了基于最大

抗剪强度的级配设计方法,并应用自制的组装机大型直剪仪(如图1所示)对设计的级配进行抗剪强度试验,并与规范给出的设计级配进行对比。认为自行设计的级配能使集料的性能得到更好的发挥。周卫峰等^[13]提出将纤维均匀地掺入级配碎石中可优化其级配,并在50 kPa的围压下开展三轴剪切试验,数据显示纤维级配碎石的剪切变形小于普通级配碎石,并发现这种改良材料可用于重载交通。除材料级配外,粒料形状对剪切变形也有明显影响。例如,ROHRMAN等^[14]关于铁路碎石道砟的一项研究表明,荷载作用下越圆润的颗粒越容易发生相对滑移使得颗粒间重新排列,随时间推移道床沉降越小。王青志等^[15]以寒区高铁路基粗颗粒填料为研究对象,发现冻结状态下剪切应力-剪切位移曲线从应变软化逐渐向应变硬化过渡,且含水率增大、温度降低时黏聚力增大、内摩擦角变小。XIAO等^[16]认为在较低的应力水平下,即使提高微小的压实度也可显著改善碎石的抗剪性能。



1.滚轴;2.液压千斤顶;3.下剪切盒;4.滚珠;5.上剪切盒;6.刚性支撑;7.荷重传感器;8.传力板与传力块;9.液压千斤顶;10.滚轴;11.外框架;12.侧向支撑。

图1 大型直剪仪纵剖面^[12](单位:mm)

Fig. 1 Horizontal section of large DSA^[12](unit:mm)

1.2 动态回弹模量

动态回弹模量为描述交通荷载作用下填料刚度特性的指标,其定义为瞬时动态偏应力与回弹或可恢复应变的比值。我国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)与美国国家公路与运输协会(AASHTO)的路面设计指南《力学经验法路面设计指南:实践手册》(第三版)均将路基填料的动态回弹模量作为路面设计时必须考虑的重

要参数。近年来,已有学者通过动三轴试验来考察级配碎石的动态回弹模量。张文力等^[17]基于循环载荷作用试验,不仅建立了频率、幅值与级配碎石累积变形、回弹模量等力学参数间的关系,还分析了不同频率以及不同幅值下级配碎石变形、破碎规律,提出载荷频率是影响级配碎石变形特性的主要因素。郭乃胜等^[18]在分析级配尾矿石所在结构层的受力状态和回弹模量预估模型确定的动态模量后,得出了骨架密实型优于连续密实型的结论。常艳婷等^[19]为研究不同成型方法对级配碎石刚度特性的影响,分别测试了振动压实和静压两种成型方法下的级配碎石回弹模量,得到振动压实法下的级配碎石回弹模量显著高于静压成型法的结论。这一结论在CETIN等^[20]的研究中也被发现。张东等^[21]通过室内试验测定了8组级配碎石的回弹模量,并使用离散元方法模拟了相应的动三轴试验。试验结果表明,利用离散元模拟得到的回弹模量和实测结果是吻合的。黄晓明等^[22]指出动三轴试验可较好地模拟级配碎石层的实际受力状态,应严格控制粒径在0.075 mm以下、含量在5%~7%之间,以同时满足级配碎石层的排水渗透功能和路面受力状态。同时,Uzan模型适用于预测级配碎石的动态回弹模量且模型回归系数呈非线性变化显著。相较于Uzan模型等形式较为简单的预估模型,HAN等^[23]以饱和度作为指标直接在预估模型中体现了湿度对级配碎石动态回弹模量的影响情况,而GU和KWON等^[24-25]则建立了湿度、压实度及形状参数等物性指标与三参数模型回归系数的相关关系,间接反映了这些指标对级配碎石动态回弹模量的影响。

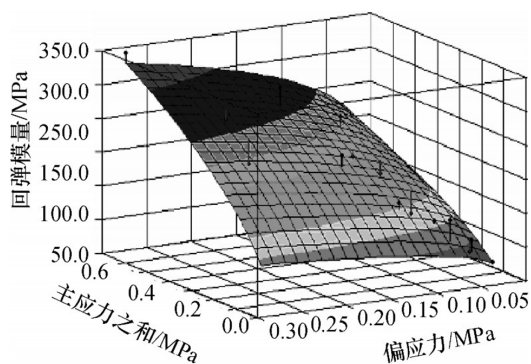


图2 级配碎石动态回弹模量与应力状态的关系(Uzan模型)^[22]

Fig. 2 Relationship between dynamic resilient modulus and stress state of graded crushed stone under Uzan model^[22]

1.3 永久变形

此外,为评价车辆荷载反复作用下碎石结构层的长期服役性能,也有相关文献对级配碎石的永久变形进行报道。李宁等^[26]对级配碎石开展了多级加载动三轴试验,结果表明,在荷载强度低于340 kPa时,永久变形快速增长,之后降低,且前400次永久变形占总永久变形的主要部分,且比例随荷载强度的升高不断增加。涂慕溪等^[27]依据12种级配碎石混合料动三轴试验数据,提出若按级配碎石基层永久变形量占结构总变形率不大于13%考虑,应该以动态三轴试验第20 000次和50 000次的变形率不大于 10^{-8} 作为级配碎石混合料抗永久变形的控制指标。高启聚等^[28]采用两种级配碎石,开展不同应力条件下的重复荷载三轴试验,基于安定理论,确定了粒料永久变形处于不同安定状态下的安定极限荷载,并提出了在塑性安定区内建立控制粒料基层永久变形设计模型的原则。CHEN等^[29]基于安定理论,建立了循环荷载下碎石材料的轴向永久变形的Werkmeister准则,如式(1)所示。

$$\begin{cases} \text{塑性安定: } \varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000} < 4.5 \times 10^{-5} \\ \text{塑性蠕变: } 4.5 \times 10^{-5} < \varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000} < 4.0 \times 10^{-4} \\ \text{增量失稳: } \varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000} > 4.0 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_{3000} 与 ε_{5000} 分别为第3 000次与第5 000次循环加载后路基土的累积永久变形。

NAZZAL等^[30]以花岗岩等三种碎石材料为研究对象,发现其永久应变依赖于应力状态,并得到“永久应变与回弹应变间具有一定的相关关系且这一关系由应力水平所决定”的重要结论。ZHANG等^[31]采用四因素三水平下正交设计的动三轴试验与灰色关联分析法确定了含水率、压实度、偏应力及围压对再生粒料永久变形的不同影响程度(如图3所示),基于此建立并验证了全面考虑湿度状态、压实状态及应力状态的再生粒料永久变形预估模型,如式(2)所示,效果较好。

$$\varepsilon_p = \alpha_1 N \alpha_2 \left(\frac{\sigma_{\text{oct}}}{\sigma_{\text{atm}}} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{\sigma_{\text{atm}}} \right)^{\alpha_4} \left(\frac{w}{w_{\text{OMC}}} \right)^{\alpha_5} K^{\alpha_6} \quad (2)$$

式中: ε_p 为永久变形; N 为加载次数; σ_{oct} 为体应力; σ_{atm} 为标准大气压强; τ_{oct} 为八面体剪应力; w 为含水率; w_{OMC} 为最佳含水率; K 为压实度; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 为模型参数。

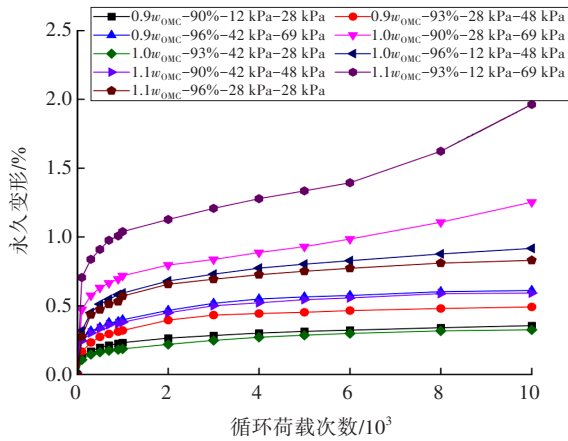


图3 不同类型的粒料永久变形发展形态^[31]

Fig. 3 Different types of permanent deformation development forms of granular materials^[31]

1.4 小结

现有研究中对于级配碎石的变形特性多基于室内试验获得,其是否可以准确指导工程实际有待验证。此外,由于级配碎石粒径较大,而室内三轴试件尺寸较小,由此产生的尺寸效应往往难以避免。虽然已有研究提出了缩尺方法,但其合理性仍有待商榷。今后研究中可以考虑进行小型加速加载试验以及换用大型三轴仪进行室内试验。

2 级配碎石的各向异性行为研究现状

由于离散性、多相性和变异性等结构特征,级配碎石的力学响应受其自身结构和物理状态影响显著^[32],主要表现为以下两个方面:一方面,荷载作用下级配碎石的变形特征是在细观尺度下受颗粒之间的摩擦、颗粒的位移、变形和破碎等综合作用的体现^[33-34];另一方面,级配碎石与一般的均匀、线弹性材料的性质不同,其变形性能在宏观尺度下受颗粒的结构特征(如压实度)、应力路径和应力历史等因素的影响^[35-37]。在理论研究中,通常将这种差异性归因于级配碎石的两种固有特性,即结构性和各向异性^[38]。颗粒的结构性通常用于表示颗粒材料的组成成分、空间排列和颗粒间作用力的综合特性。同时,颗粒的结构性也是造成颗粒材料性能明显各向异性的原因,即材料在不同方向上的物理力学性质不同。目前,国内外学者就级配碎石的各向异性

行为开展了大量的室内试验和数值模拟研究,本文从试验测试方法、演变规律表征两个方面进行分析总结。

2.1 各向异性试验测试方法

鉴于级配碎石的微细观结构的复杂性,大多数学者集中于通过常规室内试验探究材料各个方向的宏观力学性能差异及变化规律^[39]。根据试件受力状态的不同,常用的级配碎石性能测试方法可以分为常规动三轴试验、变围压动三轴试验、真三轴试验以及空心圆柱试验等。

常规动三轴试验是在恒定围压的基础上,增加了轴向的激振系统,从而能够较好地模拟反复车辆荷载作用下的路面材料的真实应力状态,自20世纪60年代以来在美国应用广泛并编制了标准测试方法^[40]。虽然这种测试方法的应力范围被认为能够覆盖路面结构层所受的真实状态,但其应力路径的设置依然难以准确表征真实车辆荷载作用。为此,变围压动三轴测试方法应运而生,提供了多种应力路径组合的功能,试件的围压和偏应力均可采用不同幅值的荷载反复作用^[41]。图4所示为美国伊利诺伊大学与IPC Global联合开发的快速三轴测试系统UI-FastCell,该设备允许采用高度和直径的比值为1:1的试件开展试验,并提供了测量样品上的垂直和径向位移的方法,以及利用两个独立控制的应力通道在垂直或径向上施加动荷载^[42]。

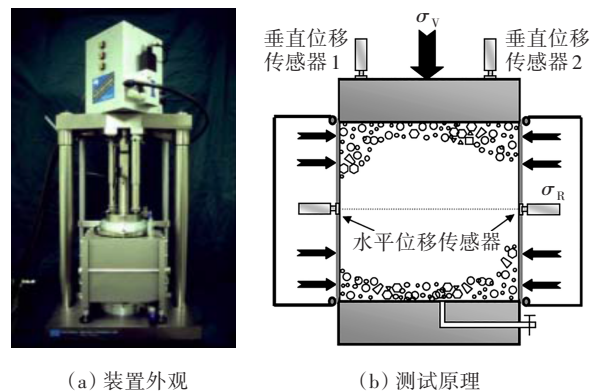


图4 UI-FastCell三轴试验装置^[42]

Fig. 4 UI-FastCell triaxial test apparatus^[42]

对于各向异性测试和参数选取,PORTER^[43]通过有限元方法比较分析了粒料层横观各向同性和均匀线弹性模型,发现荷载作用下的横观各向

同性的弯沉幅值明显小于均匀线弹性模型,并在澳大利亚 NAASRA 道路结构设计指南中推荐采用 E_x/E_y 为 0.5 的模量比表征无黏结颗粒层的力学各向异性。该设计指南中也提到采用相同的竖向和水平泊松比。MASAD 等^[44]采用 NCHRP 1-37A 表征级配碎石的非线性和各向异性,泊松比 μ 取 0.4,研究认为当模量比 g_n 从 0.5 减低至 0.3 时,有限元弯沉计算结果与 AASHO 路面测试弯沉更加吻合,且各向异性模型的误差明显小于各向同性模型。ADU-OSEI 等^[45]根据弹性理论推导了横观各向同性模型中 5 个参数在动三轴测试中的求解过程,基于此提出一套在小应力变化水平下的各向异性三轴测试方案。WANG 等^[46]认为粒料基层的模量分布受行车荷载作用的影响,粒料材料的非线性和各向异性模型有助于分析沥青路面的疲劳损伤和车辙行为。

与变围压试验不同,一般的动三轴试验设备大都基于圆柱形试件进行测试加载,其侧向围压保持一致 $\sigma_2 = \sigma_3$,而通过改变轴向或侧向应力的单向加载方式实现试件破坏,现有级配碎石本构模型也大多通过动三轴试验结果而确定。在实际工程中,级配碎石表现的各向异性并非为轴对称问题,其三向应力状态均发生动态变化且不一致,即存在不同的中间主应力和最小主应力^[47]。为此,真三轴试验设备被开发用于实现立方体试件在不同主应力方向上的复杂加载方式,但是该试验条件较为苛刻,通常三个方向加载易发生相互干扰,仅满足任一方向的单向加载,而无法获得真实应力的主轴方向连续变化^[48]。为了实现应力主轴方向的偏转, HIGHT 等^[49]开发了新型空心圆柱扭剪仪,允许对试样施加剪应力,通过改变扭矩和轴向力大小来获得与应力主轴旋转相关的不同的应力路径。LADE 等^[50]比较了中间主应力状态对砂土的真三轴试验和空心圆柱试验结果的影响,两种试验的原理图分别如图 5 和图 6 所示,结果表明空心圆柱试验受试样成型影响而存在应力不均匀性,其结果与真三轴试验结果差异较大。同时,由于与空心圆柱试样的壁厚相比,级配碎石的最大颗粒尺寸较大,限制了空心圆柱试验在材料各向异性试验中的应用。

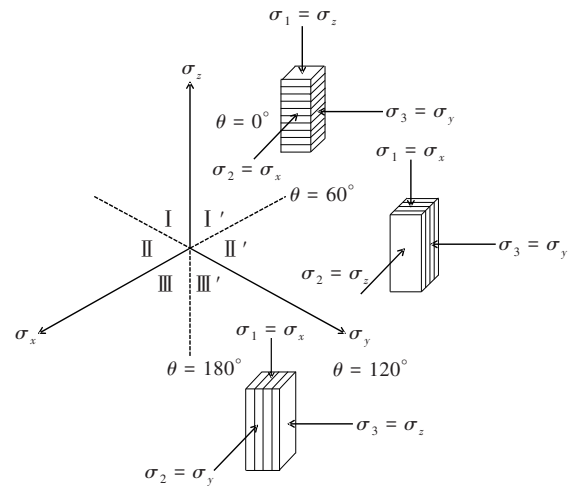


图5 真三轴试验原理图^[50]

Fig. 5 True tri-axial test schematic^[50]

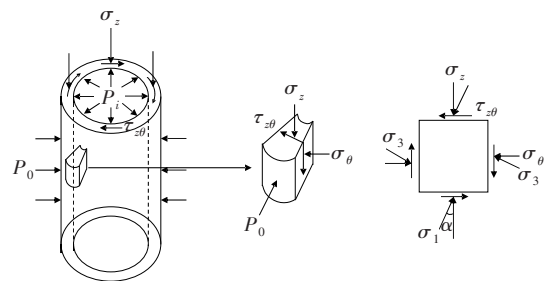


图6 空心圆柱试验原理图^[50]

Fig. 6 Principle diagram of hollow cylinder test^[50]

2.2 各向异性的演变规律表征

级配碎石受颗粒的分布、形状、方位和空隙结构及压实等因素影响,其内部结构呈明显的各向异性,这也是导致其材料变形性能各向异性的根本原因^[51]。SIDESS 等^[52]研究了不同增量应力路径、主应力比和围压对级配碎石的各向同性参数的影响,结果表明,材料的泊松比和水平参数均呈非线性变化且为前两个应力不变量的函数,材料的参数表征与加载类型密切相关。PAPADOPOULOS 等^[53]通过比较现场和室内试验结果发现现场压实的粒料基层比实验室压实的试样具有更高的刚度、更低的应力敏感性和更明显的各向异性。BILODEAU 等^[54]对集料骨架和嵌挤效应开展了深入研究,认为不同级配的无黏结颗粒材料回弹模量变化明显,并加剧了材料的各向异性。ASADI 等^[55]认为各向异性较小的基层系统的失效概率明显低于各向异性较大的基层系统,用传统的各向同性假设来表征粒料基层可能会高

估其抵抗交通载荷的能力。综上所述,在传统弹性路面计算模型中粒料基层的层底拉应力难以有效消除,受各向异性影响其材料泊松比较大,然而现有设计理论对其抗变形能力明显高估^[56]。

随着先进的图像测量和数值技术的发展,一些研究者也开始从颗粒材料的微细观结构层面揭示材料的各向异性水平,并取得了一些有益的成果^[57-58]。YANG等^[59]根据粒料试样内部法向接触的统计分布定义偏组构张量,用于量化各向异性及其在加载过程中的演化规律,并发现临界状态下组构张量的方向与应力方向保持一致。ZHANG等^[60]提出了一种利用随机生成模型模拟级配碎石的几何各向异性的数值方法,发现加载过程中试件的初始各向异性占主要作用,应力诱发各向异性对细观结构影响较小。FU等^[61]定量分析了级配碎石在准静态载荷作用下的力链分布,并定义了稳定的力链段来反映颗粒材料的受力性能和各向异性。BINAREE等^[62]开展数值试验发现,颗粒混合料的剪切性能会随着颗粒的形状变异性增加而发生单调变化,其可能是由于几何和力链的各向异性所导致的。THEOCHARIS等^[63]利用扫描线方法实现了基于孔隙图像的孔隙结构各向异性张量测定的量化方法。目前,对于级配碎石的各向异性表征及其在荷载条件下的演化规律尚处于理论阶段,室内试验往往难以有效测定材料细观结构变化,缺乏一种可供验证的量化各向异性试验测试方法。

2.3 小结

现有对于级配碎石各向异性的研究多集中在室内试验或数值模拟,而对于各向异性的理论研究较少,因此对于级配碎石的各向异性理解还不够深入。同时,在进行路面设计时,亦应对级配碎石各向异性的影响予以考虑。

3 级配碎石的力学行为主要影响因素

通过对其变形性能和各向异性研究发现,路用粒料材料的力学性能与其所处的复杂工作条件密切相关,以路基级配碎石为例,在路基湿化和交通重载的共同作用下,颗粒之间摩擦系数减小、应力发生重分布,部分颗粒出现破碎、重排现象,粒料层力学性能发生改变并产生较大的沉降变形,从而影

响路基的稳定性和整个路面结构的服役性能^[64-66]。为了避免潜在在工作状态对路基性能的不利影响,建立更加精准的粒料层力学性能预估模型,基于国内外现有的研究成果,对级配碎石力学行为的重要影响因素进行归纳,主要可以分为集料物理性质、粒料结构特征和外部应力状态3个方面。

3.1 集料物理性质

集料的棱角、形状、纹理指标等形态特征与级配碎石的变形行为有关。粗集料形状越接近立方体且棱角越分明,越有利于矿料级配集料之间的相互嵌锁,对提高颗粒材料强度和抗疲劳等路用性能起主导作用,目前主要研究成果也多集中在棱角和形状两个方面^[67-68];而良好的表面纹理有助于提高集料的抗滑性能,属于亚微观范畴,难以精确测定,多用摩擦系数来替代^[69]。

为了深入研究集料颗粒的细观特征,并进一步了解细观特征与宏观性能间的联系,国内外已经开发了很多图像采集设备和应用软件用于图像处理^[70]。这些图像处理应用软件主要包括图像获取和图像处理分析两个部分,通过数字图像处理分析的计算模块可以实现对集料的综合形状特征的提取^[71]。MAHMOUD等^[72]开发了集料形态测量系统(aggregate image measurement system, AIMS),如图7所示,并利用X-ray计算机断层扫描对比分析了粗集料三维尺寸测量的稳定性。在此基础上,REZAEI等^[73]提出了改进的AIMS II系统,利用封闭暗箱消除周围环境光的影响,并采用LED技术克服光照强度难以控制的缺点。ZHANG等^[74]研究了粗骨料的形状、尺寸、棱角性和表面纹理特性,并基于二维骨料图像提出了一种考虑粗骨料棱角性与表面纹理共同作用的指标——棱角-纹理指数。

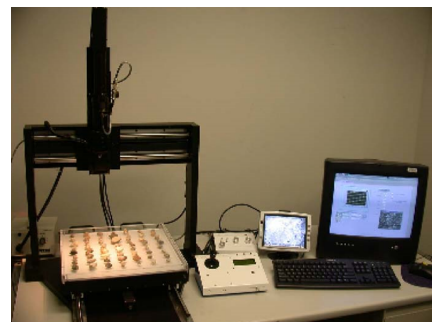


图7 集料形态测量系统(AIMS)^[72]

Fig. 7 Aggregate image measurement system^[72]

GONG等^[75]通过扫描单颗集料以获取粗集料的扫描图像,采用MATLAB算法对图像进行处理和傅里叶分析,采用处理的关键输出量表达了粗集料表面的形态特征。

研究者们将数字图像处理、工业CT及激光扫描等先进技术引入到路用集料分析的同时,也提出了大量的量化集料形态的评价指标^[76]。RAJAN等^[77]评价了三种不同的破碎机制对集料各项形态参数(棱角度、组构、长细比、球度和二维形态)的影响。POURANIAN等^[78]研究发现粗集料的平直度、伸长率、球度和圆度作为形状描述符与初始混合料的密度之间存在显著的统计相关性。LIU等^[79]通过改进的傅里叶变换干涉测量系统快速测定集料形状特征,包括球形度、平整度、伸长率、棱角度和表面纹理。GONG等^[80]利用傅里叶径向梯度变换表征集料颗粒的表面形态特征,并提出了纹理丰富度和纹理粗糙度来描述集料的纹理特性。虽然粗集料形态的评价方法很多,但目前鲜有针对不同的形态指标在数值上对集料进行分类的研究,也鲜有对于形态特征与力学性能之间相关关系的研究报道。

3.2 粒料结构特征

颗粒级配通常用于描述级配碎石的结构组成,优化级配的目的是提高其堆积密度,从而改善颗粒体系的性能和稳定性^[81]。FULLER提出了基于幂函数曲线的分级设计方法,称为 n 法^[82],如式(3)所示。最初的 n 采用0.5,现在经过多次修改后一般采用0.45。KIM等^[83-84]建立了基于填料理论和粒径分布的粗集料结构评价理论方法。开发了一个物理模型来描述集料混合料的两个基本组成部分,即主要的集料尺寸范围(dominant aggregate size range, DASR)和间质成分(interstitial components, IC),如图8所示,其中DASR的空隙率被认为是评价混合料抗变形性能好坏的关键指标。

$$P_i = 100 \cdot \left(\frac{d_i}{d}\right)^n \quad (3)$$

式中: P_i 为集料颗粒在筛孔尺寸 d_i 上的通过百分率,%; d_i 为集料中颗粒的筛孔尺寸,mm; d 为集料的最大粒径,mm; n 为级配指数。

YIDETI等^[85]在此基础上,提出了一级结构和二级结构的理论框架,如图9所示,假定材料的骨架必须由少量的细颗粒材料支撑的粗集料组成,

以有效地抵抗变形和分配荷载。该研究利用20种散体材料的CBR值进行了试验评价,结果表明颗粒状材料的CBR值在很大程度上受其承载骨架的堆积特性控制^[86]。

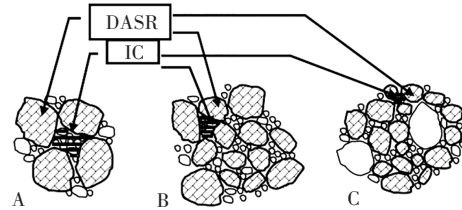


图8 混合料DASR和IC组成示意图^[83-84]

Fig. 8 Composition diagram of DASR and IC mixture^[83-84]

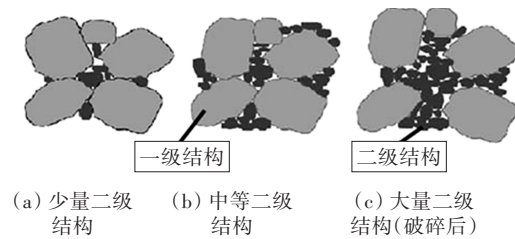


图9 一级结构和二级结构示意图^[85]

Fig. 9 Illustration of primary and secondary structures^[85]

MIAO等^[87]将集料的作用分为骨架填充和空隙填充,并提出了集料的堆积体积贡献百分比来定量描述各级筛集料对混合料堆积体积的贡献率。并在该试验结果的基础上,利用气隙含量和填料功能指数分析了骨料的填料特性,结果表明棱角度较差的堆积料的气隙含量明显小于棱角度良好的堆积料的气隙含量,而填料功能指数可用于定量区分颗粒的堆积功能^[88]。GAO等^[89]提出了平均接触点数、平均接触长度、平均垂直接触指数和平均水平接触指数4个指标评价集料混合料骨架接触特性。ZHU等^[90]利用离散元方法分析了粒径比和细粒含量对二元混合物剪切行为的影响,其中,滑动接触的比例变化趋势与弱接触的比例变化趋势相似,并认为接触滑动主要发生在弱接触处。试验研究表明,二元混合物的密度随着粒径比的增大而增大,且当细料含量在30%附近时达到最大^[91]。

3.3 外部应力状态

一些较早的研究已经指出,级配碎石的变形行为表现出非线性特征,且受应力状态、密度、含水率、细粒含量、级配、集料性质、加载次数、频率和应力历史等多种因素的影响^[92-93]。其中,应力

水平是影响材料性能最主要的因素。有关研究表明,级配碎石具有应力硬化的特点,回弹模量随着围压和偏应力的增加而增加^[94]。XIAO等^[95]认为在反复施加应力的情况下,应力历史效应是试件渐进致密化和颗粒重排的结果。CERNI等^[96]通过反复三轴试验研究了应力路径和应力水平对回弹模量的影响,结果表明,初始加载的应力历史和调节阶段应力水平会影响材料的模量值和应力敏感性。CHEN等^[97]进行了三次饱和循环三轴试验,通过逐步增加循环偏应力,确定稳定弹性模量所需的合理循环数,以区分试验材料在循环载荷作用下变形的不稳定周期和稳定周期。LOPEZ等^[98]发现在保持细粒含量不变的情况下,随着循环偏应力的增大,细-细颗粒接触的贡献减小,粗-粗颗粒接触的贡献增大。这一结果也强调了回弹模量随循环偏应力增大且非单调发展的假设描述,这是由于细颗粒和粗颗粒在抵抗偏应力中的作用在相互转化。

此外,众所周知,路面结构在行车荷载作用下其自身所处的应力分布也同样十分复杂。图10展示了路面结构中的某个单元受到的外部冲击应力作用,每个冲击应力由垂直、水平和剪切分量组成^[99]。对于粒料基层而言,其垂直和水平方向的应力分量是正值,而剪切应力在荷载通过时会发生反向,从而导致单元的主应力轴发生旋转^[100]。近些年,一些学者就行车荷载的作用形式、幅值大小、加载时间和频率等因素以及其对路面结构响应的研究展开了研究,建立了不同的荷载模型^[101-103]。但是,在理论分析和数值计算中,其结果难以真实反映实际路面结构的荷载状态,选用合适的简化模型仍是目前研究的主要方法^[104]。

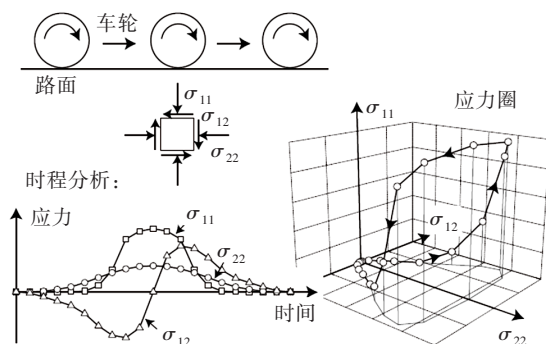


图10 车辆荷载下路面结构的应力分布^[99]

Fig. 10 Stress distribution of pavement structure under vehicle load^[99]

3.4 小结

级配碎石作为柔性基层或刚度补偿层时易产生颗粒破碎,从而改变其级配组成和结构特征。现有研究中,针对级配碎石力学性能的影响因素仅考虑了其试验前的初始状态,忽略了级配碎石颗粒破碎对于级配碎石力学性能的影响,今后研究中应予以充分考虑。

4 结论与展望

综上所述,国内外学者主要针对级配碎石的材料变形行为开展了一些研究,取得了一些有意义的研究进展,其研究表明,碎石材料的力学性能与颗粒性质、结构特征和应力状态密切相关,并具有显著的各向异性特征,其演化规律和作用机理对于路面结构设计研究具有非常重要的意义。但相关成果存在局限性,主要体现在以下几个方面:

1) 现有室内级配碎石动态测试方法费时费力且设备价格高昂,对于级配组成、含水率、成型方式等工况下级配碎石回弹模量的演化规律研究不深入;未来应充分考虑集料形状和颗粒破碎对碎石材料动态力学性能的影响,并基于此建立便捷、可靠的级配碎石动态回弹模量计算方法。

2) 现有研究多将级配碎石假定为均质、线性材料,忽略了其自身结构的各向异性特点,从而导致道路设计对于级配碎石层的力学性能评价过高,而在各向异性测试和理论研究中,其基本假设割裂了细观结构和宏观力学行为之间的关联,使得级配碎石的细观结构演化规律停留于理论分析;未来应加强细观参数对动态回弹模量的影响机理研究,建立合理的碎石性能各向异性参数的计算方法。

3) 现有对于级配碎石回弹模量的成果仅针对材料模量的演化规律,鲜有考虑结构层内部应力非均匀分布特性的级配碎石层动应力特性分析的报道;未来可探索对不同路面结构条件下动荷载作用对级配碎石层变形特性的影响并进行科学评价,通过室内试验数据验证碎石层力学响应计算的合理性。

〔参考文献〕

- [1] 黄晓明. 路基路面工程(第6版)[M]. 北京:人民交通出版社,2019.
HUANG Xiaoming. Road subgrade and pavement engineering[M]. 6th ed. Beijing: China Communications Press,2019.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报,2021,34(3):1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering research·2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
- [3] 叶向前,邹晓翎,何虹霖,等. 半刚性基层沥青路面低温开裂成因研究综述[J]. 中外公路,2020,40(4):62-67. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.014.
YE Xiangqian, ZOU Xiaoling, HE Honglin, et al. Review on cause of low temperature cracking for semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 62-67. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.014.
- [4] 孙建伟. 高速公路基层级配碎石性能及其CBR试验和数值模拟研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019. DOI:10.27334/d.cnki.gstdy.2019.000248.
SUN Jianwei. Experimental and numerical simulation on performance and CBR of graded macadam base of expressway[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2019.000248.
- [5] 黄拓,昌振东,漆帅. 路面结构的路基刚度提高方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2777-2782. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2017.10.030.
HUANG Tuo, CHANG Zhendong, QI Shuai. Promotion method of subgrade stiffness for pavement structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2777-2782. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.10.030.
- [6] 余祥晶. 动荷载作用下级配碎石颗粒破碎和回弹模量影响规律研究[D]. 西安:长安大学,2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.000828.
YU Xiangjing. Study on performance of particle breakage and resilient modulus of ugm under dynamic load[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.000828.
- [7] 李崛. 级配碎石动态回弹模量计算及其路基刚度调控方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2021.
LI Jue. The research on resilient modulus calculation of graded crushed rock and its stiffness improvement on subgrade[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.
- [8] LI S H, HAO P W. Stress dependent and redistribution behaviour of unbound granular material[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(3): 347-356. DOI:10.1080/10298436.2018.1475667.
- [9] LI N, MA B, WANG H, et al. Development of elasto-plastic constitutive model for unbound granular materials under repeated loads[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23: 100347. DOI:10.1016/j.trgeo.2020.100347.
- [10] 王鹏程,刘建坤. 颗粒形状对不良级配碎石集料剪切特性的影响[J]. 岩土力学,2017,38(8):2198-2202,2212. DOI:10.16285/j.rsm.2017.08.006.
WANG Pengcheng, LIU Jiankun. Effect of particle shape on the shear behavior of open-graded crushed aggregate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2198-2202, 2212. DOI:10.16285/j.rsm.2017.08.006.
- [11] 蒋应军,李思超,王天林. 级配碎石动三轴试验的数值模拟方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2013,43(3):604-609. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2013.03.029.
JIANG Yingjun, LI Sichao, WANG Tianlin. Numerical method of dynamic triaxial test on graded crushed rock [J]. Journal of southeast university (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 604-609. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2013.03.029.
- [12] 邢心魁,滕德涛,张家文,等. 基于最大抗剪强度的碎石配比研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(6):59-62,67. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2014.06.13.
XING Xinkui, TENG Detao, ZHANG Jiawen, et al. Broken stone gradation research under maximum shear strength [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(6): 59-62, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2014.06.13.
- [13] 周卫峰,李彦伟,苗乾,等. 纤维级配碎石性能研究[J]. 建筑材料学报,2015,18(6):1050-1054. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2015.06.024.
ZHOU Weifeng, LI Yanwei, MIAO Qian, et al. Study on technical performance of fiber graded crushed rock [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 1050-1054. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2015.06.024.
- [14] ROHRMAN A K, KASHANI H F, HO C L. Effects of natural abrasion on railroad ballast strength and deformation properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118315. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118315.
- [15] 王青志,朱鑫鑫,刘建坤,等. 寒区高速铁路路基粗颗粒填料大型直剪试验研究[J]. 铁道学报,2016,38(8):102-109. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.08.015.
WANG Qingzhi, ZHU Xinxin, LIU Jiankun, et al.

- Experimental study on direct shear tests of coarse-grained fillings of high-speed railway subgrade in cold region[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 102-109. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2016.08.015.
- [16] XIAO Y J, CHEN L X, ZHANG Z, et al. Laboratory validation of a gradation design concept for sustainable applications of unbound granular materials in pavement construction[J]. Construction and Building Materials, 2016, 129: 125-139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.108.
- [17] 张文力,冯梅梅,吴疆宇.循环荷载作用下下级配碎石力学特性试验研究[J].实验力学,2020,35(4):629-638. DOI:10.7520/1001-4888-18-210.
ZHANG Wenli, FENG Meimei, WU Jiangyu. Experimental study on mechanical properties of graded aggregate under cyclic loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4): 629-638. DOI: 10.7520/1001-4888-18-210.
- [18] 郭乃胜,王聪,赵颖华.级配铁尾矿石的动三轴试验研究[J].大连海事大学学报,2013,39(3):112-116. DOI:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2013.03.003.
GUO Naisheng, WANG Cong, ZHAO Yinghua. Dynamic triaxial test on graded iron tailing[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(3): 112-116. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2013.03.003.
- [19] 常艳婷,陈忠达,张震,等.不同成型方法级配碎石的抗变形性能[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(2):251-256. DOI:10.14188/j.1671-8844.2017-02-015.
CHANG Yanting, CHEN Zhongda, ZHANG Zhen, et al. Study of anti-deformation properties of grade macadam with different molding methods[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(2): 251-256. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2017-02-015.
- [20] CETIN A, KAYA Z, CETIN B, et al. Influence of laboratory compaction method on mechanical and hydraulic characteristics of unbound granular base materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2014, 15(1): 220-235. DOI: 10.1080/14680629.2013.869505.
- [21] 张东,黄晓明,田飞.级配碎石动三轴试验离散元模拟[J].公路交通科技,2014,31(12):39-42,49. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2014.12.007.
ZHANG Dong, HUANG Xiaoming, TIAN Fei. Simulation of dynamic triaxial test of graded crushed stone by discrete element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(12): 39-42, 49. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.12.007.
- [22] 黄晓明,许涛,黄成造.级配碎石动态力学性能对隧道路面受力的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 92-97. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.210267.
HUANG Xiaoming, XU Tao, HUANG Chengzao. Effects of dynamic mechanical properties of grading macadam on tunnel pavement stress[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(2): 92-97. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.210267.
- [23] HAN Z, ZOU W L, WANG X Q. Predicting water retention curve and resilient modulus of compacted natural and recycled pavement unbound granular materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(13): 1697-1710. DOI: 10.1080/10298436.2020.1714618.
- [24] GU F, SAHIN H, LUO X, et al. Estimation of resilient modulus of unbound aggregates using performance-related base course properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(6): 04014188. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001147.
- [25] KWON J, KIM S H, TUTUMLUER E, et al. Characterisation of unbound aggregate materials considering physical and morphological properties[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(4): 303-308. DOI: 10.1080/10298436.2015.1065997.
- [26] 李宁,马磊,李瑞,等.基于PUMA的单级和多级加载模式下碎石粒料性能研究[J].公路交通科技,2019,36(3):62-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.03.010.
LI Ning, MA Biao, LI Rui, et al. Study on performance of unbound granular materials under single-stage and multi-stage loading modes based on PUMA[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(3): 62-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.03.010.
- [27] 涂慕溪,严二虎,陈礼彪,等.基于性能的级配碎石混合料设计指标[J].公路交通科技,2019,36(9):31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.09.005.
TU Muxi, YAN Erhu, CHEN Libiao, et al. Performance-based design indicators for graded macadam mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(9): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.09.005.
- [28] 高启聚,姚祖康.粒料基层设计指标和控制模型研究[J].公路交通科技,2016,33(5):39-45. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.05.007.
GAO Qiju, YAO Zukang. Study on design index and model for controlling permanent deformation of granular base course[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(5): 39-45. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.05.007.
- [29] CHEN W B, FENG W Q, YIN J H, et al. Characterization

- of permanent axial strain of granular materials subjected to cyclic loading based on shakedown theory [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 198: 751–761. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.012.
- [30] NAZZAL M D, MOHAMMAD L N, AUSTIN A. Evaluating laboratory tests for use in specifications for unbound base course materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(4): 04020036. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003042.
- [31] ZHANG J H, ZHANG A S, LI J, et al. Gray correlation analysis and prediction on permanent deformation of subgrade filled with construction and demolition materials[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(18): 3035. DOI: 10.3390/ma12183035.
- [32] NAGULA S S, ROBINSON R G, KRISHNAN J M. Mechanical characterization of pavement granular materials using hardening soil model[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(12): 04018157. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001291.
- [33] MURPHY K A, MACKEITH A K, ROTH L K, et al. The intertwined roles of particle shape and surface roughness in controlling the shear strength of a granular material[J]. *Granular Matter*, 2019, 21(3): 72. DOI: 10.1007/s10035-019-0913-7.
- [34] SARKAR D, GOUDARZY M, KÖNIG D. An interpretation of the influence of particle shape on the mechanical behavior of granular material[J]. *Granular Matter*, 2019, 21(3): 53. DOI: 10.1007/s10035-019-0909-3.
- [35] 齐阳,唐新军,李晓庆.粗粒土应力诱发各向异性真三轴试验颗粒流模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(12): 2292–2300. DOI: 10.11779/CJGE201512020.
- QI Yang, TANG Xinjun, LI Xiaoqing. Stress-induced anisotropy of coarse-grained soil by true triaxial tests based on PFC[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12): 2292–2300. DOI: 10.11779/CJGE201512020.
- [36] 武文举,马艳霞,张吾渝,等.循环荷载下原状黄土的动应力:动应变关系试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(4): 731–737. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2018.04.018.
- WU Wenju, MA Yanxia, ZHANG Wuyu, et al. An experimental study on the dynamic stress-strain relationship of intact loess under cyclic loading[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(4): 731–737. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2018.04.018.
- [37] 王蕴嘉,宋二祥.堆石料颗粒形状对堆积密度及强度影响的离散元分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2416–2426. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0346.
- WANG Yunjia, SONG Erxiang. Discrete element analysis of the particle shape effect on packing density and strength of rockfills[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2416–2426. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0346.
- [38] 蒋明镜,付昌,刘静德,等.不同沉积方向各向异性结构性砂土离散元力学特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(1): 138–146. DOI: 10.11779/CJGE201601015.
- JIANG Mingjing, FU Chang, LIU Jingde, et al. DEM simulations of anisotropic structured sand with different deposit directions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(1): 138–146. DOI: 10.11779/CJGE201601015.
- [39] CHEN Q S, INDRARATNA B, CARTER J P, et al. Isotropic-kinematic hardening model for coarse granular soils capturing particle breakage and cyclic loading under triaxial stress space[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(4): 646–658. DOI: 10.1139/cgj-2015-0166.
- [40] AASHTO T294-94. Standard method of test for resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials-SHRP protocol P46[S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1995.
- [41] SIMONSEN E, ISACSSON U. Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(4): 863–875. DOI: 10.1139/cgj-38-4-863.
- [42] TUTUMLUER E, ADU-OSEI A, LITTLE D, et al. Field validation of the cross-anisotropic behavior of unbound aggregate bases[R]. Austin: Texas Transportation Institute, the Texas A&M University System, 2001.
- [43] PORTER D W. Technical basis of the 1992 austroads pavement design guide (flexible pavements) [R]. Adelaide: Australian Road Research Board, 1999.
- [44] MASAD S, LITTLE D, MASAD E. Analysis of flexible pavement response and performance using isotropic and anisotropic material properties[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(4): 342–349. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:4(342).
- [45] ADU-OSEI A, LITTLE D N, LYTTON R L. Cross-anisotropic characterization of unbound granular materials[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1757(1): 82–91. DOI: 10.3141/1757-10.
- [46] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000465.
- [47] 张坤勇, 李威, Charkley Nai Frederick, 等. 小主应力方向加载条件下的掺砾黏土真三轴试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3270–3276. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2609. ZHANG Kunyong, LI Wei, FREDERICK C N, et al. True triaxial test on clay mixed with gravel with stress increment loading from minor principal stress direction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3270–3276. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2609.
- [48] PAN J J, JIANG J W, CHENG Z L, et al. Large-scale true triaxial test on stress-strain and strength properties of rockfill[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(1): 04019146. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001527.
- [49] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, 33(4): 355–383. DOI: 10.1680/geot.1983.33.4.355.
- [50] LADE P V, RODRIGUEZ N M. Comparison of true triaxial and hollow cylinder tests on cross-anisotropic sand specimens[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(4): 20130155. DOI: 10.1520/GTJ20130155.
- [51] BISWAL D R, CHANDRA SAHOO U, RANJAN DASH S. Structural response of an inverted pavement with stabilised base by numerical approach considering isotropic and anisotropic properties of unbound layers [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(8): 2160–2179. DOI: 10.1080/14680629.2019.1595701.
- [52] SIDESS A, UZAN J, NIGEM P. Fundamental characterisation of the anisotropic resilient behaviour of unbound granular materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(3): 283–293. DOI: 10.1080/10298436.2019.1605072.
- [53] PAPAPOPOULOS E, CORTES D D, CARLOS SANTAMARINA J. In-situ assessment of the stress-dependent stiffness of unbound aggregate bases: application in inverted base pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(10): 870–877. DOI: 10.1080/10298436.2015.1022779.
- [54] BILODEAU J P, DORÉ G. Relating resilient behaviour of compacted unbound base granular materials to matrix and interlock characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 220–228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.036.
- [55] ASADI M, ASHTIANI R S. Stability analysis of anisotropic granular base layers in flexible pavements [J]. Transportation Geotechnics, 2018, 14: 183–189. DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.01.001.
- [56] OH J H, LYTTON R L, KIM N S. Modeling of pavement response using nonlinear cross-anisotropic approach[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2005, 9(4): 329–334. DOI: 10.1007/BF02829046.
- [57] KODICHERLA S P K, GONG G B, YANG Z X, et al. The influence of particle elongations on direct shear behaviour of granular materials using DEM[J]. Granular Matter, 2019, 21(4): 86. DOI: 10.1007/s10035-019-0947-x.
- [58] RADJAI F, ROUX J N, DAOUADJI A. Modeling granular materials: century-long research across scales[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(4): 04017002. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001196.
- [59] YANG Z X, WU Y. Critical state for anisotropic granular materials: a discrete element perspective[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(2): 04016054. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000720.
- [60] ZHANG J H, LI J, YAO Y S, et al. Geometric anisotropy modeling and shear behavior evaluation of graded crushed rocks[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 346–355. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.188.
- [61] FU L L, ZHOU S H, GUO P J, et al. Induced force chain anisotropy of cohesionless granular materials during biaxial compression[J]. Granular Matter, 2019, 21(3): 52. DOI: 10.1007/s10035-019-0899-1.
- [62] BINAREE T, PREECHAWUTTIPONG I, AZÉMA E. Effects of particle shape mixture on strength and structure of sheared granular materials[J]. Physical Review E, 2019, 100(1-1): 012904. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.012904.
- [63] THEOCHARIS A I, VAIRAKTARIS E, DAFALIAS Y F. Scan line void fabric anisotropy tensors of granular media[J]. Granular Matter, 2017, 19(4): 68. DOI: 10.1007/s10035-017-0752-3.
- [64] VAITKUS A, ŽALIMIENĖ L, ŽIDANAVIČIŪTĖ J, et al. Influence of temperature and moisture content on pavement bearing capacity with improved subgrade[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(23): 3826. DOI: 10.3390/ma12233826.
- [65] ZHANG J H, PENG J H, ZHENG J L, et al. Characterisation of stress and moisture-dependent resilient behaviour for compacted clays in South China [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(1): 262–275. DOI: 10.1080/14680629.2018.1481138.
- [66] KAVUSSI A, QORBANINIK M, HASSANI A. The influence of moisture content and compaction level on LWD modulus of unbound granular base layers[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 20: 100252. DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.100252.

- [67] COOK C S, TANYU B F, YAVUZ A B. Effect of particle shape on durability and performance of unbound aggregate base[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(2): 04016221. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001752.
- [68] BYUN Y H, FENG B, QAMHIA I I A, et al. Aggregate properties affecting shear strength and permanent deformation characteristics of unbound-base course materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(1): 04019332. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003000.
- [69] LI P L, DING Z, RAO W Y. Evaluation of deformation properties of asphalt mixture using aggregate slip test[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 17(6): 542–549. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007229.
- [70] 黄文柯, 张肖宁. 利用形态学多尺度算法分割粗集料粘连图像[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(3): 125–130. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.02. HUANG Wenke, ZHANG Xiaoning. Segmentation of coarse aggregate adhesion images using morphological multiscale algorithm[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(3): 125–130. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.02.
- [71] FANG M J, PARK D, SINGURANAYO J L, et al. Aggregate gradation theory, design and its impact on asphalt pavement performance: a review[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, 20(12): 1408–1424. DOI: 10.1080/10298436.2018.1430365.
- [72] MAHMOUD E, GATES L, MASAD E, et al. Comprehensive evaluation of AIMS texture, angularity, and dimension measurements[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(4): 369–379. DOI: 10.1061/ASCEMT.1943-5533.0000033.
- [73] REZAEI A, MASAD E. Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2013, 14(1): 24–35. DOI: 10.1080/10298436.2011.643793.
- [74] ZHANG D, HUANG X M, ZHAO Y L. Investigation of the shape, size, angularity and surface texture properties of coarse aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 34: 330–336. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.096.
- [75] GONG F, LIU Y, YOU Z, et al. Mineral aggregate morphological evaluation with MATLAB Fourier radial gradient transform analysis[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, 45(1): 20160141. DOI: 10.1520/JTE20160141.
- [76] JIN C, YANG X, YOU Z P. Automated real aggregate modelling approach in discrete element method based on X-ray computed tomography images[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 18(9): 837–850. DOI: 10.1080/10298436.2015.1066006.
- [77] RAJAN B, SINGH D. Investigation on effects of different crushing stages on morphology of coarse and fine aggregates[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, 21(2): 177–195. DOI: 10.1080/10298436.2018.1449951.
- [78] POURANIAN M R, SHISHEHBOR M, HADDOCK J E. Impact of the coarse aggregate shape parameters on compaction characteristics of asphalt mixtures[J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 369–386. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.01.014.
- [79] LIU Y F, SUN W J, NAIR H, et al. Quantification of aggregate morphologic characteristics as related to mechanical properties of asphalt concrete with improved FTI system[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(8): 04016046. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001535.
- [80] GONG F, LIU Y, YOU Z, et al. Mineral aggregate morphological evaluation with MATLAB Fourier radial gradient transform analysis[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, 45(1): 20160141. DOI: 10.1520/JTE20160141.
- [81] LIN H, WANG H, FAN X, et al. Particle size distribution effects on deformation properties of graded aggregate base under cyclic loading[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(3): 269–286. DOI: 10.1080/19648189.2016.1276480.
- [82] FULLER W B. *Proportioning concrete*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1905: 183–215.
- [83] KIM S. *Identification and assessment of the dominant aggregate size range of asphalt mixture*[D]. Gainesville: University of Florida, 2006.
- [84] ROQUE R, KIM S, GUARIN A. *Mixture tests to evaluate gradations for investigations in the accelerated pavement testing facility*[J]. Tallahassee, FL: Florida Department of Transportation, 2006.
- [85] YIDETI T F, BIRGISSON B, JELAGIN D, et al. Packing theory-based framework to evaluate permanent deformation of unbound granular materials[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2013, 14(3): 309–320. DOI: 10.1080/10298436.2012.736620.
- [86] YIDETI T F, BIRGISSON B, JELAGIN D. Influence of aggregate packing structure on California bearing ratio values of unbound granular materials[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2014, 15(1): 102–113. DOI: 10.1080/14680629.2013.863160.
- [87] MIAO Y H, WANG S D, GUO L Y, et al. A method for quantifying the packing function of particles in packed aggregate blend[J]. *Construction and Building Materials*,

- 2018, 188: 607–614. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2018. 08.142.
- [88] MIAO Y H, LIU X, HOU Y, et al. Packing characteristics of aggregate with consideration of particle size and morphology[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 869. DOI: 10.3390/app9050869.
- [89] GAO J F, WANG H N, BU Y, et al. Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 472–484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2018.06.170.
- [90] ZHU Y G, NIE Z H, GONG J, et al. An analysis of the effects of the size ratio and fines content on the shear behaviors of binary mixtures using DEM[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103353. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103353.
- [91] ZHOU W, XU K, MA G, et al. Effects of particle size ratio on the macro-and microscopic behaviors of binary mixtures at the maximum packing efficiency state[J]. Granular Matter, 2016, 18(4): 81. DOI: 10.1007/s10035-016-0678-1.
- [92] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Pavement design model for unbound granular materials [J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(5): 665–674. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130: 5(665).
- [93] CORONADO O, CAICEDO B, TAIBI S, et al. Effect of water content on the resilient behavior of non standard unbound granular materials[J]. Transportation Geotechnics, 2016, 7: 29–39. DOI: 10.1016/j.trgeo. 2016. 04.004.
- [94] LI N, WANG H, MA B, et al. Investigation of unbound granular material behavior using precision unbound material analyzer and repeated load triaxial test[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 18: 1–9. DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.10.006.
- [95] XIAO Y J, ZHANG Z, CHEN L X, et al. Modeling stress path dependency of cyclic plastic strain accumulation of unbound granular materials under moving wheel loads [J]. Materials & Design, 2018, 137: 9–21. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.024.
- [96] CERNI G, CORRADINI A, PASQUINI E, et al. Resilient behaviour of unbound granular materials through repeated load triaxial test: influence of the conditioning stress[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(1): 70–88. DOI: 10.1080/14680629.2014.964294.
- [97] CHEN W B, FENG W Q, YIN J H. Effects of water content on resilient modulus of a granular material with high fines content[J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117542. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2019.117542.
- [98] LOPEZ R D F, EKBLAD J, SILFWERBRAND J. Resilient properties of binary granular mixtures: a numerical investigation[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76: 222–233. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.03.002.
- [99] RONDÓN H A, WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS T, et al. Comparison of cyclic triaxial behavior of unbound granular material under constant and variable confining pressure[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(7): 467–478. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000009.
- [100] XIAO Y J, ZHENG K Y, CHEN L X, et al. Shakedown analysis of cyclic plastic deformation characteristics of unbound granular materials under moving wheel loads [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 457–472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.064.
- [101] HAN Z Q, SHA A M, HU L Q, et al. Full-scale investigation on the traffic load influence zone and its dimension for HMA layer in inverted pavement[J]. Construction and Building Materials, 2019, 219: 19–30. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.110.
- [102] QIAN J G, WANG Y G, WANG J, et al. The influence of traffic moving speed on shakedown limits of flexible pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(2): 233–244. DOI: 10.1080/10298436.2017.1293259.
- [103] GIUSTOZZI F, PONZONI F, LOUHGHALAM A, et al. Sensitivity analysis of a deflection-induced pavement-vehicle interaction model[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(8): 1880–1898. DOI: 10.1080/14680629.2018.1479288.
- [104] 肖川. 典型沥青路面动力行为及其结构组合优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- XIAO Chuan. Research on dynamic behavior and structure optimization for typical asphalt pavement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

Review and prospect of research on mechanical properties of unbound aggregates

WANG Xufeng¹, ZHANG Junhui¹, LI Jue², ZHANG Anshun¹, LIU Shaoping¹

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Unbound aggregates are widely used in road engineering. In order to understand the mechanical properties of unbound aggregates, a review of the mechanical properties of unbound aggregates is conducted based on domestic and international research. Firstly, the research status of deformation performance of unbound aggregates for road is introduced, including shear deformation, dynamic resilient modulus and permanent deformation. Secondly, the anisotropy behavior of unbound aggregates is summarized and analyzed from two aspects, such as test method and evolution law characterization. Finally, the important factors influencing the mechanical behavior of unbound aggregates are summarized, and reviewed in terms of physical properties of aggregates, particle structure characteristics and external stress state. The analysis shows that: The mechanical properties of unbound aggregates are closely related to particle properties, structural characteristics and stress state, and are characterized by significant anisotropy. In the future, further research can be carried out from the aspects of rebound modulus calculation method, performance anisotropy parameter calculation method and dynamic stress response analysis.

Key words: road engineering; unbound aggregate; mechanical property; deformation property; anisotropy

Manuscript received: 2022-08-12; **revised:** 2022-09-09; **accepted:** 2022-09-14

Foundation item: Project (52025085) supported by the National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars; Project (2022SK2083) supported by Key Research and Development of Hunan Province; Project (CX2021SS06) supported by Changsha University of Science & Technology Postgraduate Research Innovation Project

Corresponding author: ZHANG Junhui (1978—)(ORCID: 0000-0003-4199-4884), male, professor, research interest: design and treatment of special subgrade. E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

(责任编辑:赵冰;校对:刘平;英文编辑:田湘)