

文章编号:1671-8879(2015)01-0033-08

沥青混合料剪胀力学行为研究综述

张建同, 杨 军

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:为了分析沥青混合料剪胀力学行为,阐述了沥青混合料剪胀行为,回顾了剪胀相关试验及剪胀模型的现状和问题,并对其研究方向进行了展望。研究表明:沥青混合料剪胀行为在车辙产生中起着关键作用;采用 X-ray CT 技术、离散元方法等对颗粒空间分布、大小、接触方式、破碎等进行定性及定量地分析沥青混合料变形机理和力学特性;通过建立微观力学模型,联系宏观力学变量与微观力学变量,使得微观测试、力学试验和数值模拟连为一体,预测沥青混合料剪胀行为,可为抗车辙沥青路面设计提供指导,开拓沥青混合料设计新思路。

关键词:道路工程;沥青混合料;剪胀行为;微观力学;综述

中图分类号:U414

文献标志码:A

Review of study on shear dilation of asphalt mixture

ZHANG Jian-tong, YANG Jun

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: This paper elaborated the dilation behavior of asphalt mixtures. The research developing and existing problems of dilatancy tests and models were reviewed. Moreover, the future work of dilatancy tests and models were discussed. The research results show that the asphalt mixture dilation behavior plays a key role in the process of rutting; the deformation mechanism and mechanics characteristics of asphalt mixtures can be qualitatively and quantitatively analyzed by using X-ray CT technology and discrete element method to obtain the distribution, size, contact, and crush of particles; the microscopic testing, mechanics testing, and numerical modeling can be used to predict the dilation behavior of asphalt mixtures as a system through building microscopic mechanics model and connecting macroscopic mechanics variable to microscopic mechanics variable, which can be used to guide the design of anti-rutting asphalt pavement; the new prospect for asphalt mixture designing will be developed. 1 tab, 1 fig, 73 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; shear dilation behavior; micromechanics; review

0 引 言

车辙是车辆在路面行驶后留下的车轮永久压痕,在沥青路面的各种破坏现象中,车辙问题尤其重

要,它除了影响行车舒适性外,还对交通安全有直接影响。车辙形成过程中存在剪胀现象,这已经引起了国内外学者的关注。剪胀为颗粒组成的混合料在剪切过程中产生的体积膨胀现象。在交通荷载的重

收稿日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51078089);东南大学优秀博士论文基金资助项目(YBJJ1347)

作者简介:张建同(1980-),男,广东阳江人,工学博士研究生,E-mail:yangjun@seu.edu.cn。

复作用下,沥青混凝土发生剪胀。剪胀行为与混合料的组分(如集料的体积含量、级配、形状以及尺寸)以及试验条件(加载、卸载、温度、围压)有关。已有分析模型用来预测理想混合料的剪胀,鉴于复杂的交通环境及荷载条件,预测沥青路面的性能仍具有挑战性。沥青混合料表现为非均匀及包含粗颗粒、细颗粒、沥青黏合剂、空隙率的多相材料。其中,粗集料具有不规则的形状、不同的方向角、级配(尺寸分布),胶结料表现为与温度、时间、加载率相关的黏弹行为。为了认识和减少路面主要病害,如车辙、开裂等,国内外学者提出了很多模型,如黏弹、黏塑和黏损伤模型,但大多没有考虑颗粒几何因素。近些年,一些考虑了复杂混合料的微观结构以及颗粒-颗粒互相作用的新模型被提出。模拟沥青混凝土的主要 2 种方法是:连续介质模拟方法和微观力学方法。连续介质模型基于已知边界条件、通过有限元预测沥青混凝土性能,然而这种方法一般不考虑微观结构对材料宏观行为的影响;相反,微观力学模型则直接采用微观结构模拟沥青混凝土的复杂几何,但是采用有限元或离散元模拟微观结构的真实几何精度是受限制的。此外,微观力学模型的计算对计算机要求高,也限制其作为预测模型的应用。利用模拟岩土工程材料的模型来研究沥青混合料的本构模型,考虑了微观结构,具有连续模型的优点,同时也考虑了微观结构的影响。近年来利用 X-ray CT 技术和图像分析技术研究沥青混合料的细微观结构,能够准确和非破坏地确定其微观结构。损伤和各向异性是影响颗粒材料宏观行为的重要微观结构因素。大多数工程材料在初始时都存在裂隙与空隙率这些缺陷,特别是颗粒材料。当其作用荷载时,这些不连续就会产生并不断发展。损伤普遍被认为背离了连续介质理论,这就限制了连续损伤力学在沥青混合料永久变形问题的运用。为了克服连续介质力学的缺点,须建立基于非连续介质力学模型,这是沥青混合料研究未来发展的一个方向。

基于此,本文阐述了沥青混合料剪胀力学行为,综述了剪胀相关试验及剪胀模型的发展现状和存在问题,并展望了抗车辙沥青混合料的设计发展方向。

1 剪胀力学行为

1.1 剪胀概述

沥青混合料的永久变形是一个复杂的过程,其中包括压密、剪胀变形和塑性流动^[1-2]。压密是剪切和体积应变产生的;塑性流动是高温时车辆荷载产

生的剪切应力超过混合料的剪切强度时产生的;压密(体积减小)和剪胀两者在混合料变形中所占比例是由混合料刚度、剪切强度以及其中集料及空隙组成决定的。Rahman 等把剪胀定义为垂直于裂纹面的位移,是由剪应力产生的滑移^[3]。剪胀有一个重要内涵,即在剪切过程中颗粒骨架变得松散^[4]。密实集料在荷载作用下会产生剪胀,产生的蠕变反应与偏应力及静应力有关^[5-6]。Song 等认为沥青混合料的剪切流动变形分为剪缩和剪胀,其中剪缩发生在变形初期,车辙产生时车轮轨迹下的混合料的空隙率降低,而轮迹两旁隆起部分的混合料的空隙率增加,这说明沥青混合料的剪胀在车辙产生过程中起着关键的作用^[7-8]。

1.2 剪胀试验

岩土材料的剪胀与克服颗粒互锁作用相关,这取决于围压、颗粒级配和形状性能^[9-10]。研究表明混合料的剪胀行为主要受矿物质、颗粒尺寸、分布密度、围压等因素影响^[11]。Muraya 等研究显示,对于基于石料骨架混合料,其塑性变形比黏性变形更重要^[12];而对于密实混合料,则黏性变形更重要,特别是沥青砂浆(沥青+填料+细砂)起着重要作用。Pellinen 等做过多种不同空隙率的沥青混合料的三轴强度试验,表明沥青碎石玛蹄脂(stone mastic asphalt, SMA)的抗车辙能力比密级配沥青混合料(dense gradation mix, DGM)强,因为 SMA 比 DGM 更不容易产生剪胀,而且在低空隙率的情况下具有更高的抗剪强度^[13]。Andrew 等认为 SMA 比 DGM 有更小摩擦角,即胶结料刚度在其内部摩擦中起到重要作用,这不纯粹由集料表面结构与集料颗粒形状所控制^[14]。DGM 内部摩擦角随空隙含量的增加而减小,而 SMA 则相反。SMA 比 DGM 更具有塑性行为,因为它具有更高的胶结料和基质含量(沥青+矿粉)。颗粒平均尺寸、级配、矿物等,这些都是影响剪胀行为的重要变量,但是影响方式还有待进一步研究^[15]。

1.3 剪胀模型分析

基于剪胀行为的重要性,不少学者研究了沥青混合料的三轴剪切特征,并尝试构建沥青混合料的本构模型^[16-19]。Tashman 等也提出沥青混合料的剪切强度以能量形式分 3 个机理耗散,最终产生永久变形^[20]:①克服混合料中集料间的摩擦,其影响因素有集料的几何特性及结合料性质;②克服集料间的嵌锁,其实质就是产生剪胀;③克服结合料的黏结力。沥青混合料三轴压缩试验的剪胀行为可以通

过莫尔库伦破坏理论与极限平衡状态土力学理论分析^[21]。极限平衡状态土力学理论能够耦合密度、体积变化和剪切强度对沥青混合料的影响。剪切强度采用莫尔库伦理论分析,剪胀或体积膨胀可以通过极限状态土力学分析。极限状态土力学通过指定最大摩擦角、极限摩擦角以及膨胀角来表征最大强度。Bolton 引进了膨胀指数 I_R (膨胀角函数),这进一步阐述了极限摩擦角与膨胀角的关系^[22],其中膨胀指数与摩擦角关系为

$$I_R = (\varphi_P - \varphi_C) / 3 \quad (1)$$

式中: φ_P 、 φ_C 分别为三轴压缩试验时混合料的摩擦角峰值和极限状态值。

钟晓雄等提出了一种基于混合料组构的新方法评估砂土的剪胀性^[23]。集料的体积分数及棱角对剪胀行为起重要作用,而试验条件对沥青混合料剪胀行为没有影响^[24]。1885 年,Reynolds 介绍了剪胀梯度概念,它是体应变与畸应变之比。Goddard 研究发现随着沥青含量增加,剪胀梯度减小^[25]。他们用亚球状的分析模型预测混合料的剪胀梯度,但不能预测有棱角集料试件的剪胀行为。Lacombe 等介绍了一个简单模型来描述颗粒介质在剪切条件下的摩擦性能,即以 X 为水平方向施加速度,垂直方向 Z 为滑体位置来模拟摩擦力,并以 Z 为本构模型变量表征接触力^[26]。通过模拟干湿颗粒介质,试验结果表明模型具有较好的一致性。颗粒的微观重组以及压缩对摩擦力有重要影响。颗粒在压缩条件下产生滑动,其外部剪切力可以通过剪胀来表征^[27]。

基于邓肯-张模型和 Rowe 剪胀方程,程展林等建立了体变模量、剪胀模量、剪切模量 3 参量与应力状态的关系,初步提出了一种新的非线性剪胀模型^[28]。该模型可视为邓肯-张模型的改进型模型。三轴试验条件下,一般粗粒土是先剪缩后剪胀,应具有普遍性,Rowe 剪胀方程都能准确反映这一特征。对任意尺寸分布颗粒的二维各向同性剪胀表达式,Goddard 建议采用具有摩擦的球体来模拟小围压条件下无黏性集料的屈服面形状、演变,就可以得到屈服强度(不是绝对值)^[25]。Goddard 基于次塑性模型提出了无黏性颗粒剪胀弹塑性理论,该理论耦合了 Reynolds 剪胀理论,并将其作为运动约束,同时基于颗粒组构演变,允许应变诱发各向异性^[25]。因此,各种混合料剪胀方程的建立,对于认识沥青混合料车辙机理以及预测其车辙提供了理论基础。

2 沥青混合料微观结构分析

沥青混合料是非常复杂的混合物,可以通过如

下 3 个尺度来认识:①宏观尺度,主要指所有被细集料包裹的粗集料;②细观尺度,被黏结剂包裹的细集料;③微观尺度(胶结剂),被沥青胶结料包裹的细填料。国内外开展沥青混合料微观尺度的方法主要有数字化技术、数值方法、微观力学方法等。目前,基于微观力学方法的沥青混合料设计方法过程如下^[29]:①沥青和集料特性(通过试验);②计算模型(沥青混合料的微观力学分析模型);③预估不同级配下的沥青混合料性能指标的虚拟试验(无需试验);④预估不同条件下的沥青路面的性能指标(无需试验);⑤直接运用于工业化生产。这改变了传统的沥青混合料设计理念,使得混合料设计更加科学、经济,而且具有稳定性和耐久性。

在低温时,沥青混凝土的沥青胶结料和集料的刚度接近,表现为连续材料^[30-31];但在高温时,集料的刚度比沥青胶结料的高 2~3 个数量级,其结果是沥青混凝土路面的颗粒之间结构对抵抗车辙变形累积越来越重要^[31]。因此通过连续力学预测永久性变形机理并不能反映在重载交通下的真实车辙机理。近年来出现的多相连续力学和离散单元法^[32],考虑了集料的形状、材质、级配、模量和沥青胶结料的黏弹性以及沥青混合料空隙率的分布,但是这些方法的参数测定存在困难。很多学者对沥青混凝土试件微观结构进行了分析^[33-36]。Masad 等用 Weibull 模型描述了沥青混凝土空隙率^[37]。Masad 等通过分析内部结构图像,发展了一个程序以区分集料骨架和空隙^[38]。You 等通过处理 X-ray CT 图像,发展 2D 和 3D 离散与有限单元模型,评估胶结料、集料和空隙率的相互影响^[39]。对比 X-ray CT 拍摄的圆柱试件施加径向荷载前后的图像,计算其塑性位移区域^[40],分析裂纹的扩展,以确定空隙分布对裂纹性能的影响^[41]。也有学者通过对比 X-ray CT 拍摄沥青混凝土加载前后图像,以确定它的微观结构变化^[42]。空隙的三维分布、集料的定位与形状等都是通过分析这些图片获得。沥青混合料所有单元或组成允许变形、移动和旋转,因此能量通过摩擦、接触力和整体的阻尼来消散,这些都是通过微观尺度描述^[42]。

3 微观力学本构模型分析

沥青混合料是与时间、加载率、温度相关的材料,表现为可恢复变形(黏弹)和不可恢复变形(黏塑)。微观裂纹和微观空隙及加载率相关塑性(黏塑性)硬化演变是沥青混合料热力学非线性的主要原

因。沥青混凝土开裂试验的裂隙发展行为可以采用离散单元法模拟,并结合黏结软化模型(CSM)以满足内在本构法,以拟合沥青混凝土的材料分离^[43]。一般而言,微观力学模型可以划分为两大类:一类是颗粒不存在互相作用;另一类是颗粒存在互相作用。You 建立了沥青混凝土微观力学模型,考虑了颗粒形状、颗粒尺寸及尺寸分布、颗粒的取向、组份的分散相及连续相、黏合剂的连续相与离散相,有利于剪胀行为微观研究^[44]。沥青混合料剪胀行为与黏塑性变形有关,而沥青混合料的损伤断裂是黏塑性变形作用的结果。沥青混合料是准脆性复合材料,具有脆性颗粒和黏性胶结料,用非线性断裂力学来描述其断裂模型是个极大的挑战,其断裂模式由主裂纹、裂纹分支、二次裂纹和微裂纹组成。Dugdale 等分别提出了黏结模型以观测延性材料和脆性材料的断裂行为^[45-46]。Kim 等利用微观断裂力学方法模拟了热拌沥青混凝土^[47]。沥青混凝土不均匀的微观结构可采用高级晶格模型和离散单元法来研究,这更真实地模拟了微观结构发展至断裂过程^[48]。离散单元法同样也用来模拟具有更复杂黏结模型(如软化类型本构模型)材料的断裂行为^[49-50]。

发展沥青混合料本构模型有很多方法,其中包括有:Schapery 非线性理论的运用、基于土力学理论的运用、黏弹或黏塑模型的运用、基于颗粒接触的离散单元法^[51-58]。这些本构模型一般没有考虑剪胀效应,仅仅适用于稳态变形行为。Ossa 对沥青混合料多轴反应发展了一个简单现象学模型,并把剪胀作为运动约束^[59]。Zlender 提出了一个考虑弹塑性行为、回弹行为的模型,预测沥青路面在循环交通荷载下的永久变形^[60]。准确地模拟路面长期行为还需要考虑永久应变的累积以及应力条件^[61]。Darabi 等提出基于率相关硬化松弛模型,这个模型能够提高预测高温、循环荷载条件下沥青路面永久变形的精度^[62-63]。把 Perzyna 黏塑性模型和 Schapery 非线性黏弹性模型与时间相关的损伤和微观愈合模型进行耦合,可模拟沥青混凝土在各种荷载和环境条件下的力学反应^[62-64]。以上研究均采用了经典硬化黏塑性理论预测沥青混凝土永久变形。经典硬化黏塑性模型往往与试验数据不符合,其原因是:沥青混凝土在变形中是各向异性的(颗粒在变形中方向重新分布);经典黏塑性硬化理论假设材料的黏塑性性质在卸载(或者静止期间)是不变的;适用于没有微观结构或者在卸载过程中微观结构变化可以忽略的同质材料。

事实上,沥青混凝土的微观结构随颗粒的位置、方向、颗粒之间的摩擦与咬合作用等的变化而变化。沥青混合料循环荷载试验时,受限制的颗粒之间的黏结剂将残余应力传递给颗粒,从而引起颗粒的重分布、位置和方向的改变,因此为下一个循环荷载增加了潜在的黏塑性变形^[63],即微观结构随塑性变形改变而变化。黏塑性反应中的软化(时间相关)不是由于损伤演变(裂隙和空隙)或温度增加造成的;可以通过黏塑性理论分析,看成是材料硬化的恢复能力。因此,在静止期间,沥青混凝土微观的变化,容许沥青组份恢复先前的黏塑性硬化状态,所以表现出有更多的黏塑性变形。对在循环荷载下滑动体的塑性软化反应,用加载摩擦模型进行研究,但其不能用于具有复杂微观结构的沥青混凝土^[65-67]。

沥青混凝土的性质与颗粒相关位置、方向、互锁程度有关,相比受荷前,在受荷之后其有更本质的改变,这种改变使得沥青混凝土更趋向于永久性变形。这是因为试验温度高时,胶结剂变得更软和容易变形,而且胶结剂和残余应力在温度升高时,松弛更快,时间相关的残余应力引起微观结构重组更快,相反有更多的硬化恢复。沥青混凝土的微观结构重排列可采用表 1 的方法模拟。

表 1 沥青混凝土的微观结构重排列模拟方法

Tab. 1 Modeling methods of asphalt mixture in rearrangement microstructure

方法 1	在卸载过程中的屈服面定义一个各向同性软化函数,此方法的缺点是参数较多,要做更多的试验来确定参数。
方法 2	把软化/硬化函数分解为硬化和软化部分,硬化部分在加载时容许发展;软化部分在卸载时容许发展。
方法 3	获取硬化松弛反应的饱和极限(软化能力恢复等同于硬化)

表 1 的方法不适用于一般情况,须定义特定条件,例如硬化松弛模型在连续应力历史中是如何演化;黏塑性应变值较小时,硬化松弛是如何演变;在硬化松弛模型中,容许的最大恢复值是什么等。其实可以定义一个硬化松弛记忆平面(与黏塑性应变空间中的屈服面函数相似)通过内部状态变量表示。沥青混合料剪胀与硬化松弛有关。Darabi 等在研究模拟硬化松弛现象时,通过介绍黏塑性应变空间的一个硬化松弛记忆面和硬化松弛内部状态变量来记忆荷载历史^[63]。很多学者把总应变表示为弹、黏、塑性应变之和,引入连续可微的屈服函数,并给出加载、卸载和中性变载条件^[66]。由于黏性效应、中性变载时应力增量方向不再沿着流动面的切向,有些学者用能量变化情况说明黏弹性材料是否屈

服^[67]。在小变形黏弹塑性理论中,有的学者采用黏弹、黏塑性模型表示本构关系。例如,Wierzbicki 在弹黏塑简化模型基础上用 Maxwell 体表示屈服前材料的黏性行为^[68];Ottosen 用黏弹性 Burgers 体和黏塑性 Bingham 体串联进一步表示黏弹塑性行为^[69]。Gilman 用黏弹塑性细观理论论述了塑性微观动力学^[70]。许多研究人员采用 Drucker-Prager 屈服函数描述沥青混凝土黏塑性流行为,因为 Drucker-Prager 屈服准则考虑了围压、颗粒之间的摩擦、咬合作用以及沥青混凝土的剪胀^[20,66]。为了考虑压力敏感性以及区分沥青混凝土在压缩和拉伸的不同,Dessouky 等提出了修正的 Drucker-Prager

屈服函数^[71-72]。Oda 等用微观组构张量、Drucker-Prager 屈服函数(考虑各向异性)表示土颗粒的屈服行为^[73]。各向异性来源有 2 种:一种是固有的;另外一种是诱导的,由非弹性变形过程中诱导的。

总而言之,研究沥青混合料剪胀从现象认识到模型建立,从宏观分析到微观分析,如采用 X-ray CT 扫描技术、离散元方法(PFC 软件)、基于晶体网格模型等微观方法,以提出集料空间重构技术反映材料的真实情况,这直接影响到数值模拟的精度、可信度以及节约沥青混合料设计成本。因此,基于微观力学模型模拟沥青混合料剪胀行为,能够为抗车辙、抗损伤沥青路面设计提供指导(图 1)。

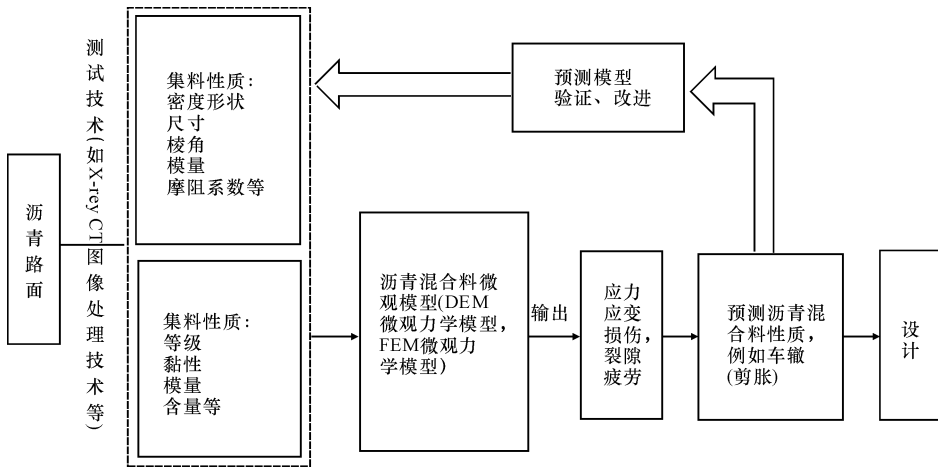


图 1 沥青路面分析与设计

Fig. 1 Procedures for asphalt pavement analysis and design

4 结 语

(1)车辙是沥青路面主要病害之一。多数表征沥青混合料车辙的本构模型都有一定的缺陷,其主要是没有考虑沥青混合料的微观结构变化,因此预测模型不能很好的预测车辙;沥青混合料的微观研究,主要应用现代先进的测试技术,对沥青及颗粒空间分布、大小、接触方式、破碎等进行定性及定量地分析其变形机理和力学特性。

(2)剪胀行为在车辙中发挥着关键作用。已有剪胀模型大多基于无黏性的砂土或碎石材料的建立,无法表征沥青混合料中胶结料的黏结性能。因此,需要考虑沥青混合料多相特性,发展一个考虑微观结构性质(如颗粒分布、各向异性、损伤、裂纹扩展等)的黏弹塑模型,特别是能够反映剪胀行为与温度、荷载大小、作用方式和作用时间的相互关系,以预测沥青混合料车辙。

(3)X-ray CT 技术、离散元、有限元等方法可有

效分析沥青混合料变形机理和力学特性,联系宏观力学变量与微观力学变量,实现微观测试、力学试验和数值模拟连为一体。因此,展望未来,可预测沥青混合料剪胀行为,为抗车辙沥青路面设计提供指导。

参考文献:

References:

- [1] 张建同,杨 军,朱浩然. 沥青混合料剪胀行为研究[J]. 建筑材料学报,2014,17(1):95-99,125.
ZHANG Jian-tong, YANG Jun, ZHU Hao-ran. Research on shear behavior of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 95-99, 125. (in Chinese)
- [2] WANG Hai-nian, HUANG Zhi-han, LI Lei, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [3] Rahman M K, Hossain M M, Rahman S S. A shear-

- dilation-based model for evaluation of hydraulically stimulated naturally fractured reservoirs[J]. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26(5): 469-497.
- [4] Wang L, Hoyos L R, Mohammad L, et al. Characterization of asphalt concrete by multi-stage true triaxial testing[J]. *Journal of ASTM International*, 2005, 2(10): 177-207.
- [5] Ossa E A, Deshpande V S, Cebon D. Triaxial deformation behavior of bituminous mixes[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(2): 124-135.
- [6] Maggiore C, Airey G, Marsac P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(1): 49-54.
- [7] Song J, Pellinen T. Dilation behavior of hot mix asphalt under triaxial loading[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2007, 8(1): 103-125.
- [8] Rismantojo E, Haddock J E, White T D. Comparison of fine aggregate uncompacted voids content measured by the ASTM C 1252 and the VTM-5 devices[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2003, 31(4): 330-336.
- [9] Lytton R L, Uzan J F, Roque E G, et al. Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes[R]. Washington DC: Strategic Highway Research Program National Academy of Sciences, 1993.
- [10] Sousa J B, Weissman S L. Modeling permanent deformation of asphalt-aggregate mixes[J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1994, 63(3): 224-257.
- [11] Campanella R G, Kokan M J. A new approach to measuring dilatancy in saturated sands[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1993, 16(4): 485-495.
- [12] Muraya P M, Molenaar A A A, van de Ven M F C. Contribution of the bituminous mortar and stone skeleton to the resistance to permanent deformation in asphalt mixtures[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2009, 37(5): 424-430.
- [13] Pellinen T K, Song J S, Xiao S. Characterization of hot mix asphalt with varying air voids content using triaxial shear strength test[C]//CAPSA. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Sun City: CAPSA, 2004: 02701-02715.
- [14] Andrew S, Peter W. Critical state soil mechanics[M]. London: McGraw-Hill, 1968.
- [15] Armstrong J E. Environmental and engineering applications of the surficial geology of the Fraser lowland, British Columbia [M]. Ottawa: Canadian Govt, Pub. Centre, 1984.
- [16] 杨挺青, 粘弹塑性本构理论及其运用[J]. *力学进展*, 1992, 22(1): 10-19.
- YANG Ting-qing. The constitutive theories of elastic-visco-plasticity and their application [J]. *Advances in Mechanics*, 1992, 22(1): 10-19. (in Chinese)
- [17] Mahler L, Ekh M, Runesson K. A class of thermo-hyperelastic-viscoplastic models for porous materials: theory and numerics[J]. *International Journal of Plasticity*, 2001, 17(7): 943-969.
- [18] Heeres O M, Suiker A S J, Borst R de. A comparison between the Perzyna viscoplastic model and the Consistency viscoplastic model[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2002, 21(1): 1-12.
- [19] Collop A C, McDowell G R, Lee Y W. Modelling dilation in an idealised asphalt mixture using discrete element modeling[J]. *Granular Matter*, 2006, 8(3/4): 175-184.
- [20] Tashman L, Masad E, Little D, et al. A microstructure-based viscoplastic model for asphalt concrete[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(9): 1659-1685.
- [21] Tan S A, Low B H, Fwa F. Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1994, 22(3): 195-203.
- [22] Bolton M D. The strength and dilatancy of sands[J]. *Geotechnique*, 1986, 36(1): 65-78.
- [23] 钟晓雄, 袁建新. 颗粒材料的剪胀模型[J]. *岩土力学*, 1992, 13(1): 1-10.
- ZHONG Xiao-xiong, YUAN Jian-xin. Shear dilating model of granular materials[J]. *Road and Soil Mechanics*, 1992, 13(1): 1-10. (in Chinese)
- [24] Ossa E A, Collop A C. Dilation behaviour of asphalt mixtures[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2006, 7(S1): 93-109.
- [25] Goddard J D. Parametric hypoplasticity as continuum model for granular media: from Stokesium to Mohr-Coulombium and beyond[J]. *Granular Matter*, 2010, 12(2): 145-150.
- [26] Lacombe F, Zapperi S, Herrmann H J. Dilatancy and friction in sheared granular media[J]. *The European*

- Physical Journal E, 2000, 2(2): 181-189.
- [27] Thompson P A, Grest G S. Granular flow: friction and the dilatancy[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(13): 1751-1754.
- [28] 程展林, 姜景山, 丁红顺, 等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 460-467.
CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Nonlinear dilatancy model for coarse-grained soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 460-467. (in Chinese)
- [29] 胡霞光. 沥青混合料微观力学分析综述[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(2): 6-10.
HU Xia-guang. Review on asphalt mixture micromechanics analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2): 6-10. (in Chinese)
- [30] Weissman S L, Harvey J T, Sackman J L, et al. Selection of laboratory test specimen dimension for permanent deformation of asphalt concrete pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1681(1): 113-120.
- [31] Weissman S L. The mechanics of permanent deformation in asphalt-aggregate mixtures; a guide to laboratory test selection[R]. Berkeley: Symplectic Engineering Corp, 1997.
- [32] You Z, Adhikari S, Dai Q. Three-dimensional discrete element models for asphalt mixtures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(12): 1053-1063.
- [33] Al Omari A A M. Analysis of HMA permeability through microstructure characterization and simulation of fluid flow in X-Ray CT images[D]. Texas: Texas A & M University, 2004.
- [34] Chang C S, Hicher P Y. An elasto-plastic model for granular materials with microstructural consideration [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(14): 4258-4277.
- [35] Dai Q L. Two- and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with X-ray computed tomography images[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 1102-1114.
- [36] Valenta R S, ejnoha M, Zeman J. Macroscopic constitutive law for mastic asphalt mixtures from computational homogenization[C]//ECCM. Proceedings of 4th European Conference on Computational Mechanics. Paris: ECCM, 2010: 19201-19202.
- [37] Masad E, Muhunthan B, Shashidhar N, et al. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88-95.
- [38] Masad E, Jandhyala V K, Dasgupta N, et al. Characterization of air void distribution in asphalt mixes using x-ray computed tomography[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(2): 122-129.
- [39] You Z P, Dai Q L. Review of advances in micromechanical modeling of aggregate-aggregate interactions in asphalt mixtures[J]. Canada Journal Civil Engineering, 2007, 34(2): 239-252.
- [40] Synolakis C E, Zhou Z, Leahy R M. Determination of internal deformation field in asphalt cores using X-ray computer tomography[J]. Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1526(1): 135-141.
- [41] Braz D, Lopes R T, Da Motta L M G. Analysis of the percentage voids of test and field specimens using computerized tomography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 1999, 422(1): 942-948.
- [42] Chang K N G, Meegoda J N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(5): 495-503.
- [43] Kim H, Wagoner M P, Buttler W G. Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test[J]. Materials and Structures, 2009, 42(5): 677-689.
- [44] You T, Abu Al-Rub R K, Masoud K D, et al. Three-dimensional microstructural modeling of asphalt concrete using a unified viscoelastic-viscoplastic-visco-damage model[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 531-548.
- [45] Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [46] Barenblatt G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7(1): 55-129.
- [47] Kim H, Buttler W G. Micromechanical fracture modeling of hot-mix asphalt concrete based on a diskshaped compact tension test[M]. Vermont South and Victoria: ARRB Group Limited, 2005.
- [48] Chang K G, Meegoda J N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(5): 495-503.
- [49] Lu M, McDowell G R. The importance of modelling

- ballast particle shape in the discrete element method [J]. *Granular Matter*, 2007, 9(1/2): 69-80.
- [50] Cundall P A, Hart R D. Numerical modelling of discontinua[J]. *Engineering Computations*, 1992, 9(2): 101-113.
- [51] Schapery R A. Correspondence principles and a generalized integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media[J]. *International Journal of Fracture*, 1984, 25(3): 195-223.
- [52] Schapery R A. Nonlinear viscoelastic solids[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(1): 359-366.
- [53] Desai S. Constitutive modeling and computer methods in geotechnical engineering[J]. *ACTA Geotechnica Slovenica*, 2010, 7(1): 4-29.
- [54] Desai C S, Pradhan S K, Cohen D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept [J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 5(4): 286-294.
- [55] Desai C S. Unified DSC constitutive model for pavement materials with numerical implementation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2007, 7(2): 83-101.
- [56] Zhu H, Sun L. A viscoelastic-viscoplastic damage constitutive model for asphalt mixtures based on thermodynamics[J]. *International Journal of Plasticity*, 2013, 40(3): 81-100.
- [57] Underwood S B, Kim R Y. Viscoelastoplastic continuum damage model for asphalt concrete in tension [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137(11): 732-739.
- [58] Lematre J, Chaboche, J L. *Mechanics of solid materials* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [59] Ossa E A. Deformation behaviour of bitumen and bituminous mixes[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2004.
- [60] Zlender B. Prediction of permanent deformation of pavement's unbounded layers based on cyclic triaxial tests[J]. *American journal of applied science*, 2008, 5(1): 22-28.
- [61] Cerni G, Cardone F, Virgili A, et al. Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 79-87.
- [62] Darabi M K, Abu Al-Rub R K, Masad E A, et al. A modified viscoplastic model to predict the permanent deformation of asphaltic materials under cyclic-compression loading at high temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 35(3): 100-134.
- [63] Darabi M K, Abu Al-Rub R K, Masad E A, et al. A thermodynamic framework for constitutive modeling of time and rate dependent materials. Part II: Numerical aspects and application to asphalt concrete[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 35(8): 67-99.
- [64] Abu Al-Rub R K, Darabi M K, Little D N, et al. A micro-damage healing model that improves prediction of fatigue life in asphalt mixes[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2010, 48(11): 966-990.
- [65] Hashiguchi K, Ozaki S. Constitutive equation for friction with transition from static to kinetic friction and recovery of static friction[J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(11): 2102-2124.
- [66] Huang C W. Development and numerical implementation of nonlinear viscoelastic-viscoplastic model for asphalt materials[D]. Texas: Texas A & M University, 2008.
- [67] Perzyna P. Fundamental problems in viscoplasticity [J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1966, 9(2): 243-386.
- [68] Wierzbicki T. A thick-walled elasto-plastic spherical container under stress and displacement boundary value condition[J]. *Arch. Mech. Stos.*, 1963, 15(2): 297-308.
- [69] Ottosen N S, Runesson K. Properties of discontinuous bifurcation solutions in elasto-plasticity[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1991, 27(4): 401-421.
- [70] Gilman J J. *Micromechanics of Flow in Solids* [M]. New York: McGraw-Hill, 1969.
- [71] Dessouky S H. Multiscale approach for modeling hot mix asphalt [D]. Texas: Texas A & M University, 2005.
- [72] Masad E, Dessouky S, Little D. Development of an elastoviscoplastic microstructural-based continuum model to predict permanent deformation in hot mix asphalt[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2007, 7(2): 119-130.
- [73] Oda M, Nakayama H. Yield function for soil with anisotropic fabric[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115(1): 89-104.