



沥青混合料高温抗剪强度及性能参数研究

张小元¹, 吕俊秀², 王修山¹, 刘 帅¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 杭州 310028)

摘 要: 为研究路面沥青混合料的高温抗剪性能, 选定 AC13 和 AC20 典型级配沥青混合料为研究对象, 通过三轴压缩试验研究了级配、温度和添加剂对混合料抗剪强度参数的影响, 根据试验结果得到混合料性能参数粘聚力、内摩擦角与温度相关的非线性拟合方程, 结合莫尔-库伦理论, 建立与围压、温度相关的材料破坏面抗剪强度预测模型。结果表明: 所得的两类级配沥青混合料全温度范围内的抗剪强度预测值与试验值有较好一致性。该预测模型对实际温度场下路面抗剪性能研究有一定参考价值。

关键词: 沥青混合料; 抗剪强度; 预测模型; 三轴压缩试验

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)09-0682-06

Research on shear strength and parameters of asphalt mixture at high temperatures

ZHANG Xiaoyuan¹, LÜ Junxiu², WANG Xiushan¹, LIU Shuai¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China)

Abstract: In order to study shear strength performance of asphalt mixtures at high temperatures, two kinds of typical graded asphalt mixtures of AC13 and AC20 were selected, and then the effects of grading, temperature and additives on the shear strength parameters of asphalt mixture were investigated by the triaxial compression test. Based on the test results, a nonlinear fitting equation of mixture properties (cohesive force and internal friction) and temperature was gained. In combination of Mohr-Coulomb theory, the prediction model of shear strength on the failure surface associated with pressure and temperature was further established. Results indicate that the predicted values of the shear strength of two types of asphalt mixtures have good consistency with the experimental values within the high-temperature range. The proposed prediction model is of some reference significance for researching the pavement shear properties in the actual temperature field.

Key words: asphalt mixture; shear strength; prediction model; triaxial compression test

0 引 言

沥青混凝土路面在高温环境受载时, 极易出现车辙、推挤、波浪、拥包等病害, 其中车辙是我国半刚

性基层沥青路面的主要破坏形式之一^[1-2]。荷载作用下沥青路面所形成的高温永久变形, 包括材料在初级阶段的压密变形和荷载应力反复作用下的流动变形, 研究表明后者对该变形起主导作用^[3-4], 而流

收稿日期: 2019-01-13 网络出版日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808500); 浙江省自然科学基金项目(LQ19E080025); 浙江理工大学科研启动项目(18052139-Y); 浙江省土木工程一流学科(B)建设计划

作者简介: 张小元(1986—), 男, 浙江新昌人, 讲师, 博士, 主要从事路面结构与材料方面的研究。

动变形产生很大程度上是由沥青混合料抗剪强度不足所致。我国沥青路面普遍采用强度较高的半刚性基层,面层中沥青混合料抗剪强度不足最终会引起永久变形累积而形成车辙,进而引发如水漂等一系列路面安全隐患,因而研究沥青混合料抗剪性能对防治车辙病害、提升车辆行驶安全有重要意义^[5-6]。

目前,对于沥青混合料抗剪性能评价及其试验方法已有相关报道,如毕玉峰等^[7]结合室内试验和三维有限元方法研究了沥青混合料的抗剪强度参数,发现单轴贯入试验可有效评价混合料的抗剪性能。朱浩然等^[4]利用三轴剪切试验研究沥青混合料的剪切性能,发现级配类型、沥青特性及试验温度对混合料抗剪强度有较大影响。此外,李强等^[8]通过多种类型室内试验研究了沥青混合料抗剪性能,发现不同试验方法对所得抗剪强度参数无显著性影响,但环境温度和混合料类型对强度参数有重要影响。虽然已有报道对沥青混合料抗剪性能作了较多评估,但有关材料抗剪性能与影响因素间定量关系模型的研究仍较少。本文采用三轴试验对不同温度、级配、添加剂的沥青混合料抗剪强度参数进行测定,分析各因素对强度参数的影响,以获得其变化规律,并提出相应预测模型,进而定量评估和预测沥青混合料高温抗剪性能。

1 原理与试验

1.1 理论基础

根据莫尔-库仑破坏准则可知,土体受各向主应力作用的某一应力面剪应力 τ 跟该面正应力 σ 比达到某一值时,土体将沿该面发生剪切破坏,其中破坏面位置与主应力无关,只与土体自身性质(内摩擦角、粘聚力)相关^[9],通过不同围压下的三轴压缩试验,可确定土体的抗剪强度包络线。莫尔-库仑破坏准则原理如图1所示。

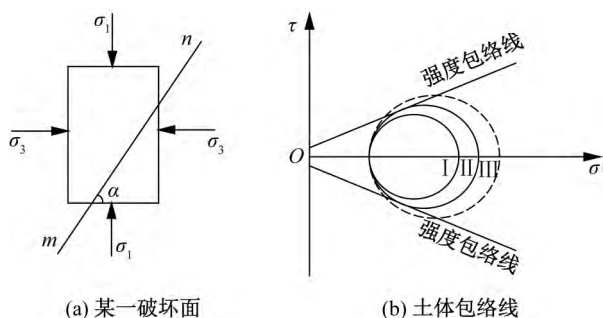


图1 莫尔-库仑破坏准则原理

沥青混合料是由高强度颗粒集料与弱粘结沥青材料所构成的一种混合体,因而混合料强度构成根据其内部结构组成通常归为两个方面:a) 沥青粘结料所构成的粘聚力;b) 颗粒集料之间嵌挤所构成的摩阻力。基于以上分析,开展沥青混合料强度构成特性研究时,可用莫尔-库仑准则分析其强度,并用两个强度参数-粘聚力 c 和内摩擦角 φ 作为分析指标^[10-11]。

通过取零围压及非零围压三轴试验的抗压强度,做出相应莫尔圆,可得抗剪强度参数 c 和 φ 值。莫尔圆示意图如图2所示,计算公式如下:

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_u}{\sigma_1 + \sigma_3 - \sigma_u} \right) \quad (1)$$

$$c = \frac{\sigma_u}{2} \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) \quad (2)$$

其中: σ_1 为试件有围压下的抗压强度,MPa; σ_3 为试验所选定的围压,MPa; σ_u 为零围压下的抗压强度,MPa。此外, O_1 和 O_2 分别为各自对应的莫尔圆圆心处的正应力,MPa。

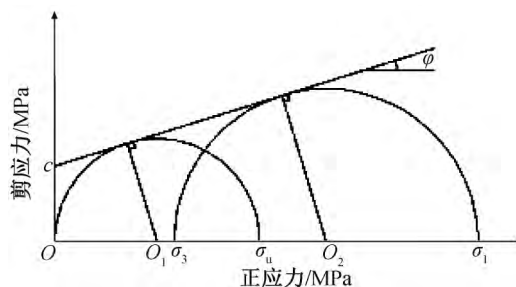


图2 c 和 φ 值求解示意图

1.2 材料

本文试验选用等级为PG76-22的SBS改性沥青,采用两种级配为AC13和AC20沥青混合料。AC13级配的粗集料用玄武岩,其余粗细集料则均为石灰岩,其中各组分材料性能指标均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)要求。对于混合料的级配组成和油石比参考文献^[12]取值,具体级配见表1,对应的AC13和AC20混合料油石比分别为4.9%和4.4%。

1.3 三轴试验

本文试件的成型仪器选用旋转压实仪,成型的圆柱形试件初步尺寸为 $\Phi 150 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$,最终的加载试件通过取芯得到尺寸为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。

由于三轴压缩下混合料受力状态与实际路面三向受力状态较为接近^[4],当考虑不同围压影响时,因此可用三轴试验获取抗剪强度参数。本文三轴试验加载均在可温控的万能材料试验机UTM-25中进行,具体装置如图3所示。

表1 两类型典型沥青混合料通过不同方孔筛的质量百分率

方孔筛孔径/mm	类型/%	
	AC13 型	AC20 型
0.075	7.9	6.3
0.150	10.2	8.2
0.300	12.9	10.3
0.600	18.4	14.7
1.180	26.2	21.1
2.360	35.2	28.5
4.750	46.8	37.8
9.500	78.1	65.0
13.200	98.2	76.3
16.000	100.0	86.5
19.000	—	96.9
26.500	—	100.0

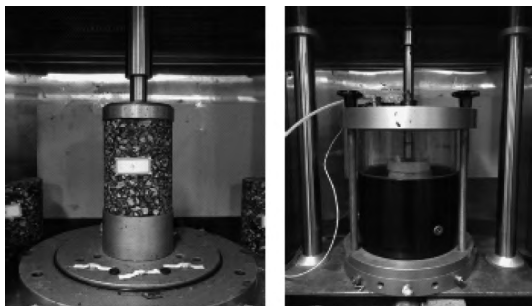
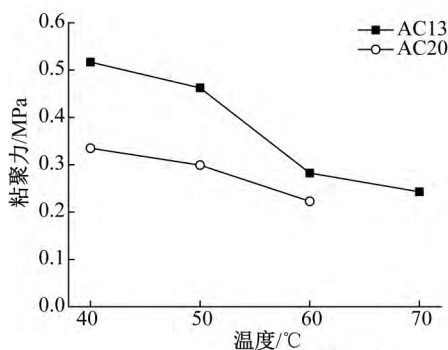


图3 三轴压缩试验加载装置^[12]

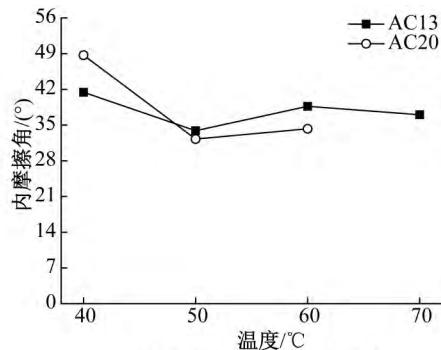
2 结果讨论与分析

2.1 级配及温度的影响

选定较为常见的上、中面层沥青混合料级配为AC13和AC20,在不同温度下进行抗剪强度试验。



(a) 不同温度下的粘聚力



(b) 不同温度下的内摩擦角

图4 不同温度下不同级配混合料的抗剪强度参数

2.2 抗车辙剂及纤维的影响

在实际工程中,混合料中通常会加一定比例的添加剂来增加面层材料的高温稳定性^[13-14]。本文选定混合料质量分数的0.4%抗车辙剂Domix和0.3%玄武岩纤维,分别研究两类添加剂对上面层AC13级配混合料抗剪性能的影响。而对中面层材料,由于工程中以加抗车辙剂为主,因而只研究加

已有研究^[12]表明,当夏季最高气温达40℃时:沥青路面距表面2cm处温度最高,可达60℃,因而对上面层AC13级配混合料选定70、60、50、40℃进行研究;沥青路面距表面7cm处的温度最高为50℃,故对中面层AC20级配材料选定60、50、40℃。对不同温控下AC13和AC20混合料试件实施零围压和有围压($\sigma_3=69\text{ kPa}$)的三轴试验,分别得到相应的抗压强度值,进而基于式(1)和式(2),可得到抗剪强度参数值粘聚力 c 及内摩擦角 φ ,参数随温度的变化情况,如图4所示。由图4(a)可知,两种级配类型的沥青混合料粘聚力 c 值均随温度升高而降低。温度由50℃升高到60℃时, c 值下降程度最大,表明此时 c 对温度最为敏感,其中AC13级配的 c 值较之AC20的下降程度更显著,两类级配分别下降约38.9%和25.5%。由图4(b)可知,两种级配类型的沥青混合料内摩擦角 φ 值随温度变化呈现波动趋势,且AC13级配混合料 φ 值波动相对较小。温度由40℃升高到50℃时, φ 值下降程度最大,此时 φ 对温度最为敏感,AC13及AC20级配混合料分别下降近18.2%和33.8%。当温度从50℃继续升高时, φ 值呈现波动趋势,在60℃时AC13和AC20级配混合料 φ 值均有小幅提升,分别提高约14.1%和6.3%。这是由于此时 c 值下降程度较大,沥青混合料在受力状态下材料内部极易因粘聚力不足而发生小错动,因此混合料摩擦角的作用得以充分体现,这也解释了其在60℃和70℃时所测内摩擦角略大于50℃时的原因。

0.4%抗车辙剂Domix对AC20级配混合料抗剪性能的影响。通过实施围压值0kPa和69kPa下的三轴试验,可得到不同级配混合料加添加剂后的抗剪强度参数,其变化情况如表2所示。对面层代表性温度的选择,上面层AC13混合料选定60℃进行对比研究;而中面层AC20混合料则选择50℃。对表2中混合料类型符号,SBS表示改性沥青混合料,

DX 表示 SBS 中加 0.4% 抗车辙剂 Domix 混合料, BF 则表示 SBS 中加 0.3% 玄武岩纤维混合料。由表 2 可知,在两种级配类型的沥青混合料中加玄武岩纤维或抗车辙剂 Domix 后,抗剪强度参数 c 和 φ 值均有所提高,其中 AC20 级配混合料参数提高尤为明显,较之不加添加剂的混合料, c 和 φ 值均提高约 20%。这说明混合料中掺添加剂,可使沥青胶结料粘结性能提升, c 值因而增大;与此同时,混合料中集料表面裹覆着一层沥青膜,当集料在受力状态下发生滑移时,不仅要克服集料间的嵌挤力,还需克服集料颗粒表面沥青膜的粘滞阻力,故温度相同时,加纤维和抗车辙剂后, φ 值也会有所提高。

表 2 加抗车辙剂或纤维后的沥青混合料抗剪性能参数

混合料类型	粘聚力/MPa		内摩擦角/(°)	
	AC13	AC20	AC13	AC20
SBS	0.282	0.299	38.682	32.261
DX	0.301	0.358	40.589	38.757
BF	0.305	—	40.455	—

3 抗剪强度模型与验证

3.1 粘聚力 c

结合粘聚力 c 的试验值变化趋势,提出了一个非线性函数对试验结果进行拟合,用公式表示为:

$$y = B + \frac{(A - B)}{1 + \exp\left(\frac{x - C}{D}\right)} \quad (3)$$

其中: A 、 B 、 C 、 D 为待求参数; x 为自变量,即代表温度的大小。分别拟合两种级配类型沥青混合料的抗剪强度参数粘聚力 c 与温度 T 的关系,如图 5 所示。

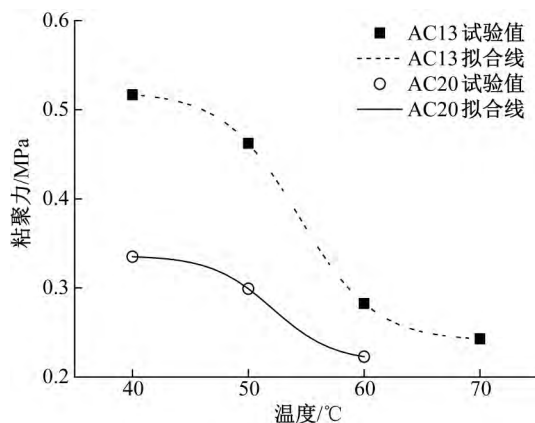


图 5 粘聚力 c 值拟合曲线

可得到 AC13 级配混合料粘聚力 c 值的预测模型为:

$$c_1 = 0.240629 + \frac{(0.520108 - 0.240629)}{1 + \exp\left(\frac{T - 54.360948}{3.246458}\right)} \quad (4)$$

其中:参数 $A = 0.520108$, $B = 0.240629$, $C = 54.360948$, $D = 3.246458$ 。

而 AC20 级配混合料粘聚力 c 值的预测模型为:

$$c_2 = 0.336172 + \frac{(0.217134 - 0.336172)}{1 + \exp\left(\frac{T - 52.091252}{-2.636123}\right)} \quad (5)$$

其中:参数 $A = 0.217134$, $B = 0.336172$, $C = 52.091252$, $D = -2.636123$ 。

3.2 内摩擦角 φ

同样地,结合内摩擦角 φ 的试验值变化趋势,提出了以下非线性函数对试验值进行拟合:

$$y = A_0 x^{B_0} + C_0 \sin x^{D_0} \quad (6)$$

其中: A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 为待求参数。分别拟合两种级配类型沥青混合料的抗剪强度参数内摩擦角 φ 与温度 T 的关系,如图 6 所示。

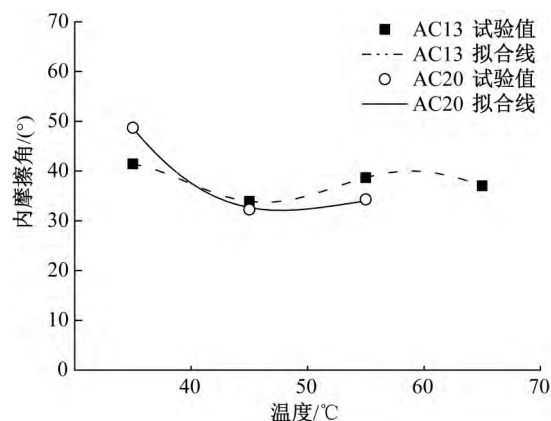


图 6 内摩擦角 φ 值拟合曲线

可得 AC13 级配混合料内摩擦角 φ 值的预测模型为:

$$\varphi_1 = 53.892529 T^{-0.093857} + 3.536265 \sin T^{0.724808} \quad (7)$$

其中:参数 $A_0 = 53.892529$, $B_0 = -0.093857$, $C_0 = 3.536265$, $D_0 = 0.724808$ 。

而 AC20 级配混合料内摩擦角 φ 值的预测模型为:

$$\varphi_2 = 7627.848978 T^{-1.345295} + 8.090708 \sin T^{0.625562} \quad (8)$$

其中:参数 $A_0 = 7627.848978$, $B_0 = -1.345295$, $C_0 = 8.090708$, $D_0 = 0.625562$ 。

3.3 破坏面上剪应力值 τ_0

3.3.1 抗剪强度预测模型

通过以上抗剪强度参数变化规律的分析,拟合了两种级配类型下 c 、 φ 值与温度 T 相关的非线性方程,以此进一步通过莫尔-库伦理论求解破坏面上剪应力值 τ_0 ,建立其与 c 、 φ 值相关的预测模型。

对于一次性受压破坏时混合料破坏面上的 τ_0 ,可通过下式计算获得^[12]:

$$\tau_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \varphi \quad (9)$$

利用式(1)~(2)和式(9),消去中间变量,进一步推导得破坏面上 τ_0 仅含有 c 、 φ 、 σ_3 的公式为:

$$\tau_0 = \frac{\sigma_3 \sin \varphi + c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \cos \varphi \quad (10)$$

其中:围压 σ_3 可通过试验选定; c 值利用模型(4)或

(5)获得; φ 值利用模型(7)或模型(8)获得。在已知试验温度、受力情况以及级配时,可用式(10)对试件破坏面剪应力值进行预测。

3.3.2 预测模型的验证

对本文两类级配的混合料分别实施三轴一次性破坏试验,在给定温度下通过改变围压值 σ_3 可测得不同抗压强度值 σ_1 ,再代入式(9)可得对应破坏面 τ_0 的试验值,多组给定温度下的结果如图7的空心点所示。另外,对于预测结果,通过在给定温度下确定一系列围压值 σ_3 ,再利用 c 、 φ 及 τ_0 的预测模型,可直接预测围压增大时 τ_0 的变化趋势,如图7的点线所示。由图7可知,预测值与实测值存在较好的一致性,说明所提出的混合料抗剪强度参数模型能较好预测给定温度下不同围压所对应的一次性受压破坏面上 τ_0 值。

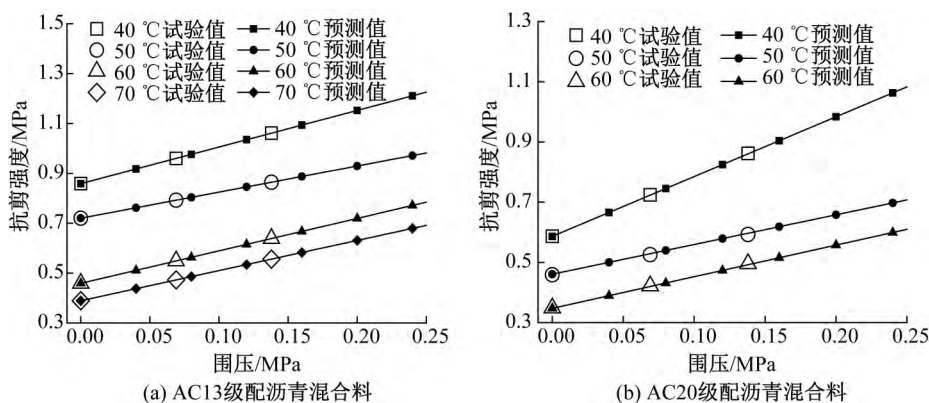


图7 不同围压下沥青混合料的抗剪强度

同样地,在给定围压下进行三轴一次性破坏试验,通过改变温度值可测得不同抗压强度,再代入式(9)得到对应破坏面 τ_0 试验值,多组给定围压下的结果如图8的空心点所示。此外,在给定围压下通过确定一系列温度值,利用 c 、 φ 及 τ_0 的预测模型,

可直接预测温度增加时 τ_0 的变化趋势,预测结果如图8的点线所示。由图8可知,预测值与实测值存在较好一致性,即两种级配的沥青混合料模型均能较为精确地预测在给定围压值下不同温度对应的一次性受压破坏面 τ_0 值。

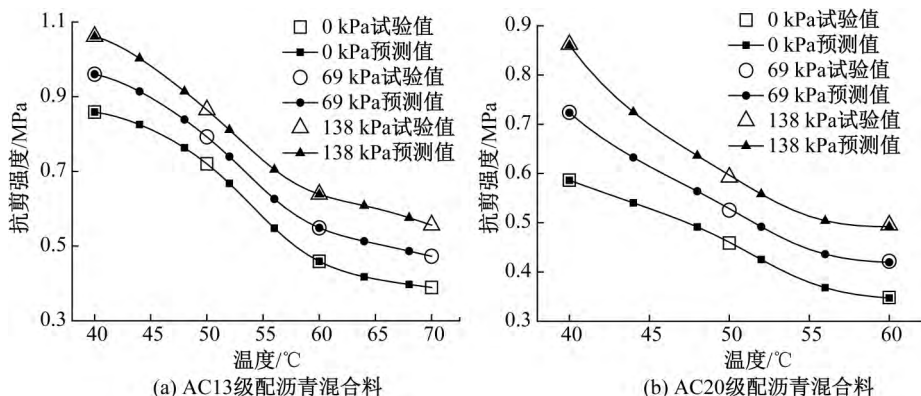


图8 不同温度下沥青混合料的抗剪强度

4 结 论

通过三轴试验对级配、温度及添加剂影响沥青混合料抗剪参数的测定,分析了各因素对参数的影响,得到了其变化规律,提出了相应预测模型,主要有如下结论:

a) 对粘聚力 c , AC13 级配沥青混合料要明显大于 AC20 的结果;对内摩擦角 φ ,则稍有波动,但温度较高时,AC13 混合料要稍大于 AC20 的结果;对破坏面剪应力值 τ_0 ,相同试验条件下 AC13 混合料要明显大于 AC20 的结果。

b) 随温度升高,沥青混合料粘聚力逐渐减小,温度从 50 °C 升至 60 °C 度时,下降程度最大,AC13 和 AC20 混合料分别下降约 38.9% 和 25.5%;内摩擦角则呈波动状态,在 40 °C 升至 50 °C 度时下降突然,AC13 和 AC20 混合料分别下降近 18.2% 和 33.8%,后随温度升高而较平稳波动;相同受力状态下温度越高,混合料破坏面剪应力值越小。

c) 通过混合料中加纤维及抗车辙剂,可改变沥青混合料粘聚力和内摩擦角,并提高混合料高温抗剪性能,其中 AC20 混合料加抗车辙剂后,抗剪参数提高尤为明显,较之 SBS 混合料, c 和 φ 值均提高约 20%。

d) 通过三轴一次性破坏试验分别考虑温度和围压对 AC13 和 AC20 混合料抗剪强度 τ_0 预测值的验证分析,结果表明高温范围内预测值与实验值有较好一致性,所提出的抗剪强度预测模型有效性得到验证。

参考文献:

- [1] 王辉,李雪连,张起森. 高温重载作用下沥青路面车辙研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 139-144.
- [2] 张争奇,陶晶,杨博. 沥青混合料高温性能设计参数研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1): 23-28.
- [3] Huang C W, Abu Al-Rub R K, Masad E A, et al. Three-dimensional simulations of asphalt pavement permanent deformation using a nonlinear viscoelastic and

viscoplastic model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(1): 56-68.

- [4] 朱浩然,杨军,陈志伟. 沥青混合料抗剪性能的三轴剪切试验[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 19-23.
- [5] Fwa T F, Pasindu H R, Ong G P. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration[J]. Journal of transportation engineering, 2011, 138(4): 423-429.
- [6] 李智,王子硕,邓志刚,等. 沥青混合料三维仿真设计及虚拟剪切试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 1049-1056.
- [7] 毕玉峰,孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1036-1040.
- [8] 李强,侯睿,马翔,等. 沥青混合料抗剪性能试验方法及影响因素研究[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 50-54.
- [9] Bai Y, Wierzbicki T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture[J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(1): 1-20.
- [10] Wang H, Al-Qadi I. Near-surface pavement failure under multiaxial stress state in thick asphalt pavement [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2154(1): 91-99.
- [11] Zhu S Y, Fu Q, Cai C B, et al. Damage evolution and dynamic response of cement asphalt mortar layer of slab track under vehicle dynamic load[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(10): 1883-1894.
- [12] 顾兴宇,吕俊秀,张小元,等. 沥青混合料高温蠕变失稳点预测模型及参数影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 1013-1019.
- [13] Fazaeli H, Samin Y, Pirnoun A, et al. Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj-Chaloos Road) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 273-283.
- [14] 赵阳,王晓川. 聚合物改性剂对沥青混合料抗车辙性能的影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(5): 90-93.

(责任编辑:刘国金)