

# 沥青混合料抗剪性能与细观损伤关系模型研究

张维嘉<sup>1</sup>, 肖鹏<sup>1,2\*</sup>, 杨盼盼<sup>1</sup>, 郑佳辉<sup>1</sup>

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州, 225127; 2. 扬州大学 城市规划与发展研究院)

**摘要:** 试验采用上面层为 SMA-13、下面层为 AC-20 的双层车辙试件。结合室内试验模拟混合料剪切变形过程, 测试不同车辙深度辙槽处与隆起处的抗剪强度, 通过数字图像处理技术对沥青混合料组合试件切面图像进行处理, 分别从宏观和细观两个层面对车辙形貌进行研究, 建立了沥青混合料抗剪性能与细观损伤程度关系模型。通过对不同工况下的车辙试件分析表明: 高温和重载降低了混合料抗剪能力, 宏观上隆起处与车辙处抗剪强度的比值呈现不均匀性增大, 从微观角度发现车辙剪切变形后, 辙槽处的空隙率下降, 隆起处增长; 下面层沥青面积比减小, 上面层沥青面积比增大; 在图像级配方面, 变化主要发生在 4.75~9.5 mm 粒径处。

**关键词:** 沥青混合料; 抗剪性能; 细观特性; 关系模型

沥青路面是中国高速公路的主要路面形式, 有调查显示, 美国洲际公路和干线公路的路面损坏 30% 由车辙导致; 在日本由于车辙引起的路面损害高达 80%; 中国由于重型交通荷载和高温的耦合作用, 路面使用 2 年后就出现了明显的车辙。国内外许多研究表明: 车辙主要是沥青混凝土在车辆荷载作用下发生的剪切变形, 是影响高速公路沥青路面的最严重破坏形式之一。汪德才等基于单轴贯入试验和无侧限抗压强度试验, 测试乳化沥青冷再生混合料的抗剪特性参数; Ma 从微观力学角度发现粗集料的运动会削弱集料骨架的稳定性, 导致沥青混合料产生严重的车辙变形; Hu 发现沥青混合料空隙率和粗集料含量对高温破坏有明显影响; 张肖宁等采用工业 CT 获取沥青混合料断面扫描图像, 发现压实过程中空隙与集料的分布状况能够影响车辙变形量。目前尚未有综合宏观形貌、细观特性与抗剪性能的研究。该文结合室内试验模拟混合料剪切变形过程, 通过单轴贯入试验测试不同车辙深度辙槽处与隆起处的抗剪强度, 通过数字图像处理技术对沥青混合料组合试件切面图像进行处理, 研究沥青面层细观特性指标随车辙形变加剧的变化情况, 建立沥青混合料抗剪性能与细观损伤程度的关系模型。

## 1 试验

### 1.1 原材料

研究表明: 路面结构的中下面层对车辙变形影响显著。试验采用上面层为 SMA-13、下面层为 AC-20 的双层车辙试件, 选用的沥青为 SBS 改性沥青和 70# 道路基质石油沥青, 其各项性能指标见表 1。SMA-13 中掺入絮状木质素纤维, 占沥青混合料总质量的 0.3%。

表 1 沥青性能指标测试结果

检测指标	单位	70#	SBS
		石油沥青	改性沥青
针入度 (25 °C)	0.1 mm	71	63
延度 (5 cm/min, 15 °C)	cm	46	>100
软化点	°C	64	49
针入度指数 <i>PI</i>		0.6	-0.11
质量变化	%	-0.09	-0.06
RTFOT 针入度比	%	87	74.9
后残留物 15 °C 延度	cm	36	22.4

### 1.2 试验方法

采用 300 mm×300 mm×100 mm 的试件, 由 40

收稿日期: 2020-10-12 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51578480); 扬州大学研究生创新工程项目 (编号: XKYCX17-045)

作者简介: 张维嘉, 女, 硕士研究生。E-mail: 306295808@qq.com

\* 通信作者: 肖鹏, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: xpyzu@163.com

mm 厚的 SMA-13 与 60 mm 厚的 AC-20 组合而成,相应级配见表 2。双层车辙试件先压实下面层,成型后常温冷却 24 h,之后压实上面层沥青混合料,最后常温下放置 48 h。对辙槽处与隆起处取芯,芯样试件直径为 100 mm。

2 试验结果与分析

通过单轴贯入试验评价双层沥青混合料芯样试件的抗剪性能,对辙槽处与隆起处取芯。在不同温度、荷

载组合条件下,对试件进行车辙试验。当双层沥青混合料试件车辙最大深度达到 5、10、15、20 mm 时,测试其车辙辙槽处和隆起处的抗剪强度。选取极值点处的强度值作为试件的破坏强度,不同工况下车辙板的辙槽处与隆起处抗剪强度如图 1 所示。

由图 1 可知:在高温和重载环境下,混合料车辙形变前期隆起、下陷速度较为平缓,整体表现为车辙现象稳定形成期,而当车辙深度发生到一定程度时(10~14 mm),车辙隆起速率呈现突然的增长趋势,说明沥青路面车辙后期更多地受混合料隆起变形影响。

表 2 双层车辙试件沥青混合料级配

混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA-13	100	96.7	68.9	30.6	21.9	19.1	16.0	13.5	11.8	9.5
AC-20	100	95.9	75.3	61.8	39.6	27.6	21.8	14.5	9.1	8.6

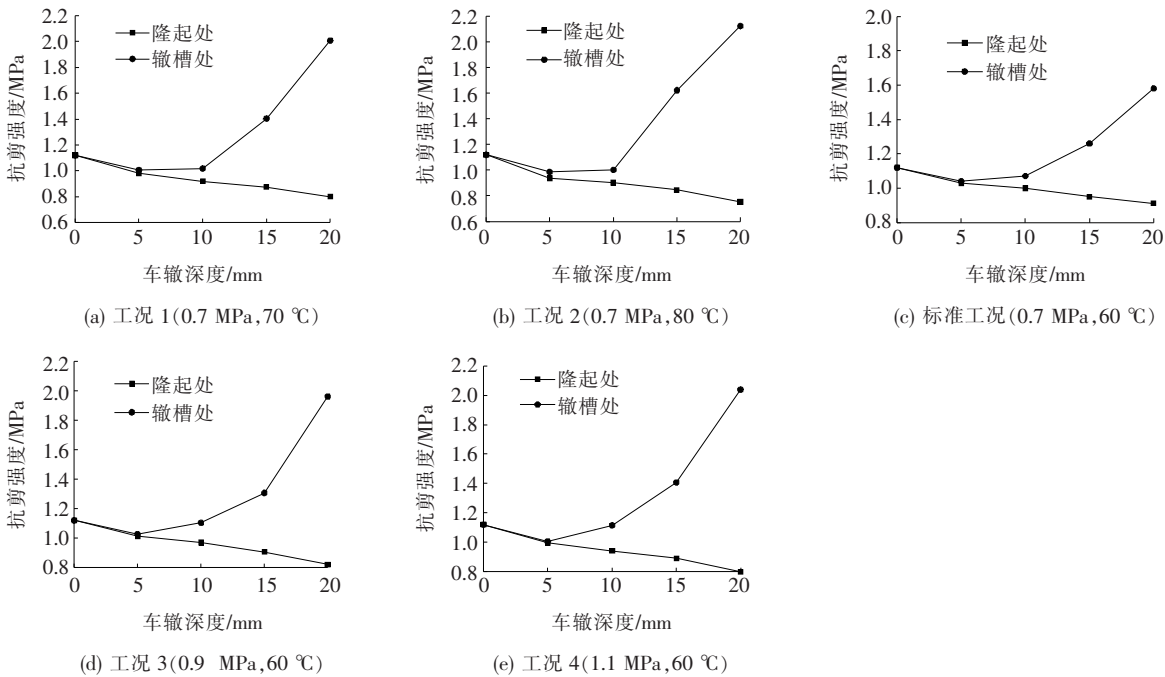


图 1 不同工况下的辙槽处与隆起处抗剪强度

不同工况下,随着车辙加深,辙槽处的抗剪强度整体呈上升趋势。车辙形成初期,荷载作用使混合料内部细骨料和胶浆向两边不均匀扩散,导致辙槽处抗剪强度略微降低;车辙形变后期,辙槽处的沥青混合料逐渐被压密,抗剪强度提高。而隆起处的抗剪强度随着车辙深度的加深逐渐降低,其原因可能是细骨料和胶浆向两边不均匀扩散,隆起处的细骨料与胶浆变多,级配变细,导致隆起处的抗剪强度降低。温度越高,抗剪强度的降低趋势越大,可以印证高温是导致路面抗剪

强度减弱的主要原因。

路面的车辙有凹陷与隆起,车辙辙槽处与隆起处的抗剪强度呈现不同的变化趋势,单独以某一处的抗剪强度全面评价路面整体的抗剪承载力缺乏合理性,该文采用离差比来评价路面的抗剪承载能力:

$$k = \frac{R'_T}{R_T} \tag{1}$$

式中: $k$  为离差比; $R_T$  为辙槽处抗剪强度(MPa); $R'_T$  为隆起处抗剪强度(MPa)。

不同工况下,随着车辙深度的变大,离差比均逐渐减小,表明隆起处与辙槽处抗剪强度的不均匀性增大。通过 Origin 拟合 5 种工况下离差比  $k$  和车辙深度之间的函数关系,发现两者间存在线性关系(图 2)。

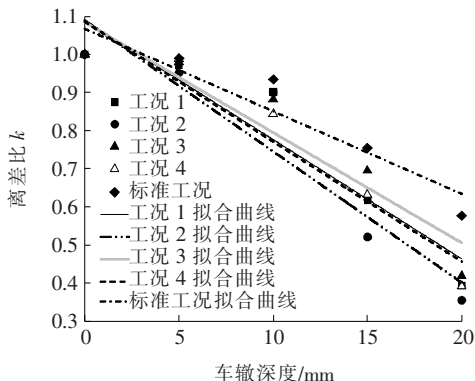


图 2 离差比与车辙深度的线性分析

由图 2 可知:在车辙变形后期,高温和重载对离差比下降速度影响较大,说明高温和重载是路面破坏的重要原因。

### 3 沥青混合料细观特性指标

随着骨架的变形,混合料内部在细观上会出现空隙、沥青膜和特征筛孔集料在数量上的衰变现象。对于同类级配组合试件,可以通过各结构层的沥青含量、空隙率和图像级配变化来研究车辙产生机理。选取工况 1~4 下试件的平面切面图像作为混合料细观特性获取对象,对截面空隙率、沥青面积比、图像级配变化这 3 个细观特性进行分析。

#### 3.1 截面空隙率

空隙率是沥青混合料级配控制的重要指标之一,该文采用改善后的双峰法对图像进行阈值分割,通过二次非线性拟合,拟合公式见式(2),各类试验条件下截面空隙率变化如图 3~6 所示。

$$VV_b = \frac{\sum f_i}{m} \quad (2)$$

式中: $VV_b$  为识别空隙面积比(%); $f$  为单个孔洞所占像素点个数; $m$  为图像像素点总数。

由图 3~6 可知:多数情况下辙槽处的空隙率小于车辙隆起处,说明行车荷载使沥青面层内部材料产生流动现象。辙槽处上面层空隙率含量要小于下面层含量。辙槽处空隙率下降,沥青混合料被压实;而在车辙隆起区域,可以发现其空隙率总体呈现增长的趋势,

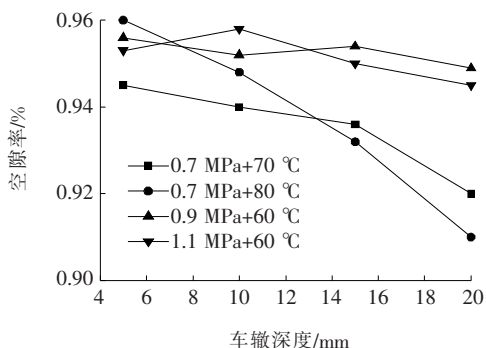


图 3 SMA-13 辙槽处空隙率变化

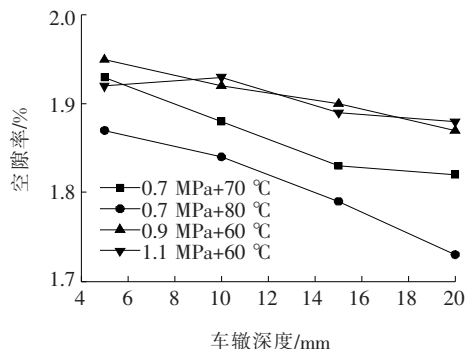


图 4 AC-20 辙槽处空隙率变化

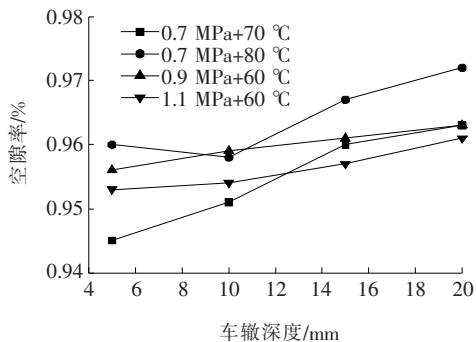


图 5 SMA-13 隆起处空隙率变化

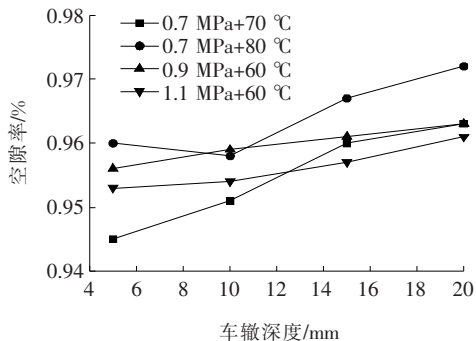


图 6 AC-20 隆起处空隙率变化

但增长幅度不一样,说明沥青混合料是不均匀流动的。

#### 3.2 沥青面积比

沥青混合料二维切片断面中暗相部分为沥青、矿

粉和空隙构成的体系,明相部分则是矿料颗粒。研究表明:沥青混合料体积组成合理时,能够增强沥青混合料的力学性能,提高路面结构的稳定性,延长使用年限。沥青混合料胶浆(沥青)的含量是体积组成中的一个重要指标,沥青混合料切面面积比值能一定程度上表征沥青含量。该文对两种级配混合料切面进行了图像沥青面积比的识别,通过式(3)计算沥青面积比,具体结果如图7、8所示。

$$P_A = \frac{\sum N_b - \sum N_a}{N} \quad (3)$$

式中: $P_A$  为沥青面积比; $N_b$  为阈值分割点左边各灰度对应像素点个数; $N_a$  为阈值分割点左边各灰度孔洞对应像素点个数; $N$  为像素点总和。

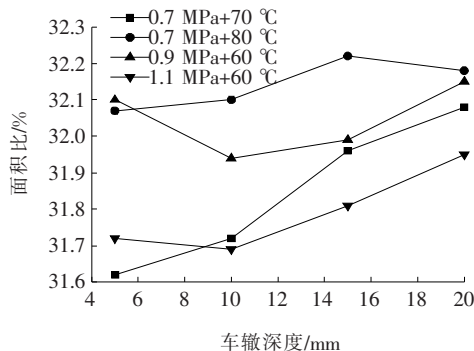


图7 SMA-13 沥青面积比

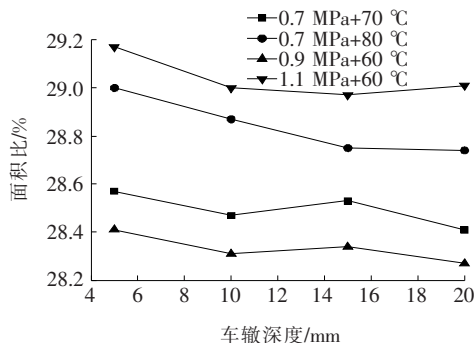


图8 AC-20 沥青面积比

由图7、8可知:车辙处各层沥青面积比的变化反映了各层沥青的蠕动迁移情况。上面层沥青面积比整体呈现增长趋势,变化量与工况因素影响关系较为复杂。荷载越大,随着车辙的加深沥青面积比变化幅度越大,温度的影响主要是加速了车辙前期沥青含量增加。而下面层沥青在荷载作用下面积比逐渐减小,可能原因是下面层沥青在荷载作用下,细骨料与胶浆往两侧扩散,经嵌挤等作用使得下面层沥青面积比减小。

### 3.3 图像级配

通过提取矿料颗粒的二维形状特性,分析沥青混

合料的矿料级配组成情况,即图像级配的概念。通过模拟实验室集料的筛分过程,以各筛孔矿料颗粒面积之和占图像总矿料面积的比值作为通过率,分析沥青混合料的矿料级配组成情况,仅选取粒径为2.36 mm以上的矿料作为统计对象,结果如图9~16所示。

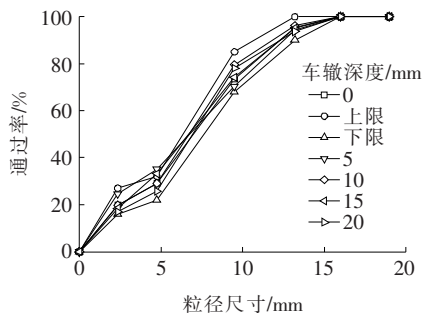


图9 SMA-13 级配(0.7 MPa+70℃)

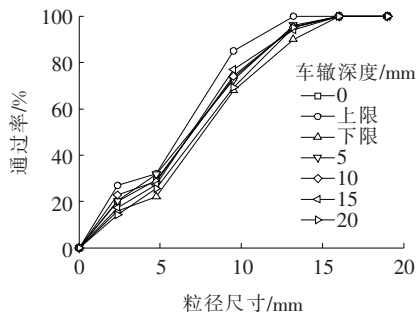


图10 SMA-13 级配(0.7 MPa+80℃)

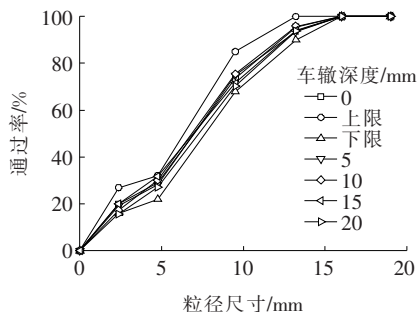


图11 SMA-13 级配(0.9 MPa+60℃)

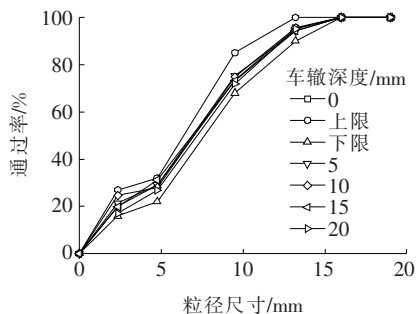


图12 SMA-13 级配(1.1 MPa+60℃)

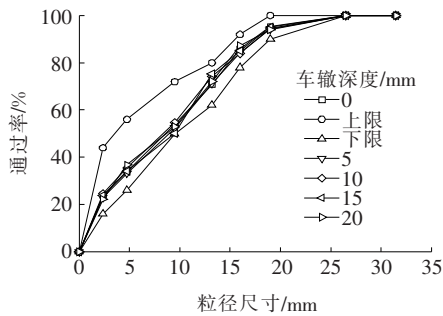


图 13 AC-20 级配(0.7 MPa+70 °C)

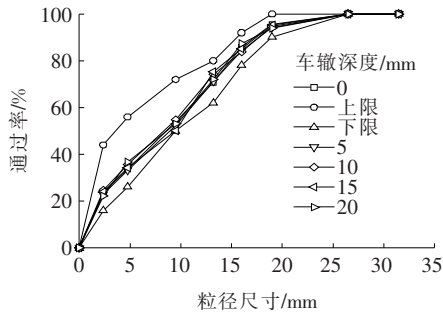


图 14 AC-20 级配(0.7 MPa+80 °C)

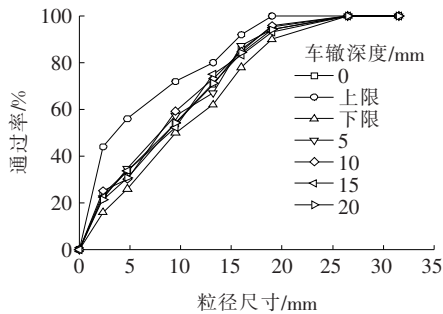


图 15 AC-20 级配(0.9 MPa+60 °C)

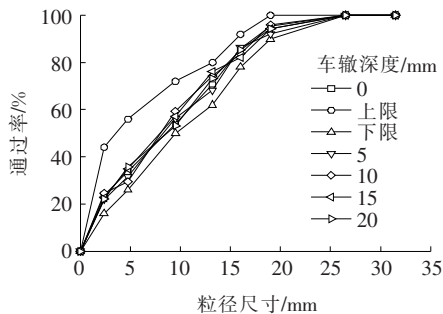


图 16 AC-20 级配(1.1 MPa+60 °C)

由图 9~16 可知:4 种工况下,SMA-13 级配的变化主要发生在 4.75 mm 粒径处,随着车辙深度的增加,4.75~9.5 mm 粒径的颗粒所占总颗粒的比值有所下降,宏观上表现为细集料减少。AC-20 级配的切面图像识别结果为细集料逐渐增多,粗集料有减少趋势,变化集中在 4.75 mm 和 9.5 mm 粒径颗粒处,

所占总颗粒的比值有所上升,考虑集料自身强度,可能是骨架颗粒(或针片状颗粒)局部被压碎,整体呈现出细粒径颗粒逐渐增多。由于辙槽处部分软弱的粗集料因为受到外力作用被压碎,使矿料级配退化。辙槽处的部分细粒径颗粒因为高温作用横向流动到车辙隆起处,使得车辙隆起处细粒径颗粒变多。

#### 4 细观特性指标、车辙深度和抗剪强度三者的关系

通过回归分析中的相关系数来分析细观变化指标与宏观形变程度的相关性,然后通过关联程度强弱依次进行排序,最终结果如表 3 所示。

表 3 灰关联系数

参考序列	工况	不同指标的灰关联系数		
		空隙率	沥青面 积比	4.75 mm 通过率
SMA-13 形变率	0.9 MPa+60 °C	0.757 1	0.766 1	0.760 7
	1.1 MPa+60 °C	0.760 9	0.766 2	0.764 0
	0.7 MPa+70 °C	0.752 0	0.767 0	0.760 5
	0.7 MPa+80 °C	0.759 4	0.765 5	0.760 9
AC-20 形变率	0.9 MPa+60 °C	0.762 6	0.768 9	0.780 2
	1.1 MPa+60 °C	0.763 2	0.767 4	0.792 1
	0.7 MPa+70 °C	0.763 7	0.767 5	0.777 3
	0.7 MPa+80 °C	0.763 6	0.766 8	0.784 0

由表 3 可以发现:两种级配切面上细观特性指标对车辙形变率的影响具有较高的一致性,两种级配的细观参数对形变率呈现出相同的影响程度,在形变贡献率的权值分配中,可考虑均值分配的方式。

##### 4.1 模型表达式

假定不管荷载、温度的组合情况,沥青混合料车辙形变程度只与切面空隙、沥青含量、4.75 mm 粒径通过率有关,且这三者之间服从线性变化关系。最终存在车辙深度  $h$  满足下式:

$$h=A \cdot \left[ \begin{matrix} X_1 \\ K_1 & K_2 & \cdots & K_6 \end{matrix} \right] \cdot \left[ \begin{matrix} X_2 \\ \vdots \\ X_6 \end{matrix} \right]$$

(4)

其中: $A$  为试件厚度; $X_i$  为切面空隙、沥青含量和 4.75 mm 粒径通过率变化对应的宏观形变率; $K_i$  为  $X_i$  对应的形变贡献率,并满足  $K_1+K_2+\cdots+K_6=1$ 。



## 4.2 模型的构建

将沥青混合料细观特性指标作为损伤指标,与变形率相结合。考虑到模型自变量的单调性,最终选取以上面层混合料空隙率、沥青面积比和下面层混合料的沥青面积比作为最终的损伤指标。初步建立如下关系:

$$h = A \{ [16.916 - 8.333(-7 + 11.73x_1)^{1/2}]K_1 + (10x_2 - 315.08)K_2 + [5.19 - 30.3(0.654 - 0.02146x_3)^{1/2}]K_3 \} \quad (5)$$

对比各项细观特性指标对试件宏观形变的影响,结合标准工况下离差比与车辙深度的表达式,发现细观特征参数、车辙深度与离差比三者之间符合如下函数关系:

$$k = -0.02 \{ A [16.916 - 8.333(-7 + 11.73x_1)^{1/2}]K_1 + (10x_2 - 315.08)K_2 + [5.19 - 30.3(0.654 - 0.02146x_3)^{1/2}]K_3 - 49.23 \} \quad (6)$$

式中: $k$  为离差比; $A$  为试件厚度; $x_1$  为上面层混合料空隙率; $x_2$  为上面层混合料沥青面积比; $x_3$  为下面层混合料沥青面积比。

## 5 结论

(1) 4 种工况下,随着车辙深度的加深,车辙处抗剪强度总体均呈上升趋势;隆起处的抗剪强度逐渐降低。随着温度的升高,抗剪强度变化更大,可以推断高温是导致路面抗剪强度减弱的主要原因。

(2) 采用离差比来评价路面的实际承载能力,发现随着车辙深度的加深,离差比减小,两者存在线性关系,说明辙槽处与隆起处抗剪强度的不均匀性增大,路面结构越不稳定,路面的实际承载能力越低。

(3) 选取截面空隙率、沥青面积比和图像级配作为沥青混合料细观特性指标。对剪切形变试件的宏观形貌进行了比对,发现混合料下陷区域的深度变化趋势大致相当,而隆起区域的隆起高度变化稍有不同。

(4) 选取上面层混合料空隙率、沥青面积比和下面层混合料的沥青面积比为细观参数,通过函数拟合,发现细观参数、车辙深度与离差比三者之间互相成立特定的函数关系。

## 参考文献:

[1] Barugahare Javilla, Liantong Mo, Fang Hao, et al. Sig-

nificance of Initial Rutting in Prediction of Rutting Development and Characterization of Asphalt Mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 157 - 164.

[2] Qiang Li, Huanhuan Yang, Fujian Ni, et al. Cause Analysis on Permanent Deformation for Asphalt Pavements Using Field Cores[J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 40 - 51.

[3] Won Jae Kim, Van Phuc Le, Hyun Jong Lee, et al. Calibration and Validation of a Rutting Model Based on Shear Stress to Strength Ratio for Asphalt Pavements[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 327 - 337.

[4] B. Birgisson, D. Darku, R. Roque, et al. The Need for Inducing Shear Instability to Obtain Relevant Parameters for HMA Rut - Resistance[J]. Assoc Asphalt Paving Technol, 2004, 73: 23 - 52.

[5] Peilong Li, Zhan Ding, Wenyu Rao. Evaluation of Deformation Properties of Asphalt Mixture Using Aggregate Slip Test[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(6): 542 - 549.

[6] 汤文, 吴学文, 孙立军. 沥青路面车辙的多参数预估模型研究[J]. 中外公路, 2016(1).

[7] 黄锋, 谷建议. 聚合物骨架混凝土与沥青混凝土车辙影响对比研究[J]. 中外公路, 2018(4).

[8] 汪德才, 张海伟, 张华. 乳化沥青冷再生混合料抗剪特性及其永久变形预估[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017(2).

[9] Tao Ma, Deyu Zhang, Yao Zhang, et al. Micromechanical Response of Aggregate Skeleton within Asphalt Mixture Based on Virtual Simulation of Wheel Tracking Test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 153 - 163.

[10] Jing Hu, Zhendong Qian, Yang Liu, et al. High-Temperature Failure in Asphalt Mixtures Using Micro-Structural Investigation and Image Analysis[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 136 - 145.

[11] 张肖宁, 肖鑫. 室内成型试件与路面芯样的抗车辙差异性评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014(8).

[12] 何立, 凌天清. 高模量结构层对沥青路面疲劳性能的影响[J]. 西部交通科技, 2016(3).

[13] 乔英娟, 王哲人, 陈静云, 等. 沥青结构层芯样分层变形的数字图像测量方法[J]. 公路交通科技, 2007(10).

[14] 周长红, 袁强, 李玉华. 压头尺寸对 HMA 单轴贯入试验性能影响的数值分析[J]. 公路交通科技, 2016(2).

# 硫酸盐渍土物理特性及纳米 $\text{SiO}_2$ 固化机理研究

钟昌茂<sup>1,2</sup>, 万旭升<sup>1\*</sup>, 龚富茂<sup>1</sup>, 慎嘉宾<sup>1</sup>, 汪凌海<sup>1</sup>, 邓世磊<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 四川 成都 610500; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司)

**摘要:**为探究含盐量及纳米  $\text{SiO}_2$  含量变化对硫酸盐渍土物理特性和盐胀特性的影响规律。以河西走廊粉质黏土为研究对象,通过一系列室内试验,测试了不同硫酸钠和纳米  $\text{SiO}_2$  含量下盐渍土的液塑限、干密度、抗剪强度和渗透系数的变化规律,并通过单次降温试验测试了纳米  $\text{SiO}_2$  对盐渍土盐胀的抑制效果。试验结果表明:在特定含水率下,随着硫酸钠含量的增大,硫酸盐渍土液塑限和干密度均有所增大,液限和塑限分别在 3% 和 2% 含盐量时达到最大增幅 9.6% 和 13.6%,最大干密度在 3% 含盐量时最大,增幅为 4.8%;抗剪强度及其强度参数先减小后增大并在含盐量为 2% 时达到最小值;渗透系数则随着含盐量的增大降低明显。硫酸盐渍土降温过程中,盐胀随含盐量增加而愈发明显,但掺入 2% 纳米  $\text{SiO}_2$  后,盐胀得到有效抑制。

**关键词:**道路工程;盐渍土;室内试验;物理特性;纳米  $\text{SiO}_2$ ;渗透系数;盐胀

当土中的易溶盐含量大于 0.3%,并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性时,应判定为盐渍土。中国盐渍土分布面积约占全球盐渍土(盐土、碱土、盐化土及碱化土)总面积的 3.8%,居世界第 4 位。西北地区是中国盐渍土分布面积最广的地区,同时也是中国“一带一路”国际战略国内前沿段,其道路、渠道和机场跑道等工程建设需求必将进一步加大,对该地区分布广泛且盐胀工程危害明显的硫酸盐渍土物理特性的研究显得极其迫切。

目前,关于硫酸盐渍土物理特性已有大量研究,张飞、付江涛等通过剪切试验发现,硫酸盐渍土黏聚力和内摩擦角随含盐量增加表现出先减小后增大的变化特征;文桃等认为含盐量对硫酸盐渍土最大干密度和最优含水率的影响规律并不是单一不变的,它取决于土中硫酸钠及 3 种状态间的相对含量,张伟等进行的 CT-三轴剪切试验表明硫酸钠的溶解和降温结晶都会影响盐渍土的应力—应变曲线并且造成土体干密度减小,引起强度降低;文桃等进一步研究表明十水硫酸钠晶体具有支架作用,其含量的增加使硫酸盐渍土的击实性能大幅降低;邴慧等对硫酸盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化进行了研究,认为天然盐渍土洗盐后,土体液塑限升高,抗剪强度参数和单轴抗压强度均

增大;钱晓明等认为土体黏聚力随冻融循环次数的增加而减小;陈炜韬等从结晶体位置变化、微观结构、盐类性质及未冻结水含量分析了冻融循环对盐渍土黏聚力的作用机理,结果表明:冻融循环过程中结晶盐晶体析出位置的变化是土体黏聚力和干密度减小的主要原因;邓友生等研究表明:在干重度相同的情况下,渗透系数随着含盐量的增加而减小,硫酸盐土的渗透系数要比氯盐土渗透系数减小显著;吴道勇、肖泽岸等开展的室内冻融循环试验证明硫酸盐渍土的盐胀变形过程是温度、水分、盐分和土体变形之间相互耦合的复杂过程。然而,关于硫酸盐渍土因为含盐量的增大造成其工程物理特性发生明显变化的研究还不够深入和全面。

Taha 等通过试验研究发现向土中掺入适量纳米材料可以缓解土的膨胀和收缩变形,减少压实样品表面干燥裂缝的发展,但不会影响其渗透系数;Liu 等在中发现纳米  $\text{SiO}_2$  和高炉矿渣的协同效应可显著降低水泥基体的孔隙度,提高其抗压强度;Ren 等通过一系列室内试验研究发现,纳米  $\text{SiO}_2$  降低了低温下土体的冻胀量,而不影响样品的重度;黄娟等认为纳米  $\text{SiO}_2$  材料可有效改善路用混凝土的抗盐冻性能,提高混凝土的耐久性;张洪亮等试验结果表明,混凝土中复掺一定量的纳米  $\text{CaCO}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  可以提高其抗硫

收稿日期:2021-02-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41601068,42071087);四川省科技计划项目(编号:2021YFQ0021)

作者简介:钟昌茂,男,硕士研究生。E-mail:swpuzcm@163.com

\* 通信作者:万旭升,男,博士,副教授。E-mail:xinyanwanxxusheng@163.com