

文章编号:1671-8879(2011)04-0012-04

# 正温时沥青混合料中间主应力效应试验

锁利军<sup>1</sup>,童怀峰<sup>1</sup>,王秉纲<sup>2</sup>

(1. 洛阳理工学院 土木工程系,河南 洛阳 471023;  
2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘要:** Mohr-Coulomb 强度理论及现有评价沥青混合料的强度试验方法均未考虑中间主应力对沥青混合料强度的影响。闭式三轴试验对应的力学分析表明,三轴挤伸的最大剪应力明显高于三轴挤压的最大剪应力,这种计算结果的差别是由中间主应力的不同而引起的。为了研究沥青混合料的中间主应力效应,以正交试验设计为基础,考虑温度、加载速度与中间主应力 3 个因素,采用平面应变试验装置测试了不同条件下沥青混合料的强度。正交试验的显著性分析表明:正温时,中间主应力对沥青混合料强度的影响最显著,温度对沥青混合料强度的影响次之,加载速率对沥青混合料的强度也有显著影响,但在 3 个因素中最弱。

**关键词:** 道路工程;沥青混合料;强度;中间主应力;正交试验

**中图分类号:** U414.1 **文献标志码:** A

## Influence of intermediate principal stress on asphalt mixture strength in positive temperature

SUO Li-jun<sup>1</sup>, TONG Huai-feng<sup>1</sup>, WANG Bing-gang<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Both strength theory of Mohr-Coulomb and testing methods, which are used to value the strength of asphalt mixture in specification, do not include intermediate principal stress. Mechanical study corresponding to closed tri-axial test is carried out. The result shows that maximum shear stress in tri-axial extrusion stress state is more than the counterparts in tri-axial compression stress state. The result is attributed to the difference of intermediate principal stress in two different stress states. In order to study the influence of intermediate principal stress on asphalt mixture strength, the characteristics of testing method, which is related to intermediate principal stress's influence on asphalt mixture strength, is considered, and testing device for plain strain is designed, and the asphalt mixture strength in different condition is tested on the base of orthogonal test, which includes three factors, such as temperature, loading velocity and intermediate principal stress. When both interaction of different factors and temperature difference are considered, the orthogonal test design significance analysis shows that intermediate principal

收稿日期:2010-07-10

基金项目:河南省科技攻关项目(102102310271);河南省教育厅自然科学项目(2010B580003)

作者简介:锁利军(1975-),男,回族,河北徐水人,讲师,工学博士,E-mail:lijunsuo@126.com。

stress has the most obvious influence on asphalt mixture strength, the followed factors are temperature and loading velocity. 6 tabs, 2 figs, 11 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; strength; intermediate principal stress; orthogonal test

## 0 引言

众所周知, Mohr-Coulomb 理论是沥青混合料的强度理论, 其摩尔圆的直径是第一主应力和第三主应力的差值, 未考虑中间主应力对沥青混合料强度的影响。公路上采用闭式三轴试验方法评价沥青混合料的剪切强度, 从受力角度看, 该试验是假三轴试验, 也就是说圆柱体试件的围压只能表现第三主应力, 未涉及中间主应力。对沥青混合料抗压强度试验而言, 圆柱形马歇尔试件抗压试验、棱柱体试件单轴压缩试验都为无侧限强度测试<sup>[1-2]</sup>。综上所述, Mohr-Coulomb 强度理论与现有规范的试验方法都未考虑中间主应力对沥青混合料强度的影响。

实际上, 路面结构中沥青混合料的真实受力状态应为三向应力状态, 其涉及中间主应力的作用。然而, Mohr-Coulomb 强度理论及其对应的闭式三轴试验未考虑中间主应力, 其所表现的应力状态与路面结构中沥青混合料的真实受力状态不符。为此, 本文设计了平面应变装置来研究不同温度、不同加载速率下沥青混合料的中间主应力效应, 为完善沥青混合料的强度理论和强度测试方法提供依据。

## 1 中间主应力效应研究的意义

现行试验规程中沥青混合料的抗剪参数是用闭式三轴仪测试圆柱体试件确定的。这种试验的力学状态为轴对称, 它虽然产生三轴应力, 但是一种特殊的三向应力状态, 即 2 个应力的数值相同。根据轴向应力与围压的相对大小, 轴对称可分为三轴挤压与三轴挤伸, 分别对应于图 1(a)、(b), 其中,  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的正应力<sup>[3]</sup>。

数值模拟轴对称的 2 种受力状态, 计算结果如图 2 所示。由图 2 可看出, 三轴挤伸的最大剪应力明显高于三轴挤压的最大剪应力。显然, 这种计算结果的差别是由中间主应力的不同而引起, 前者的中间主应力在数值上等于第三主应力, 而后的中间主应力等于第一主应力。因此, 中间主应力作用不容忽视, 中间主应力对沥青混合料强度的影响如何, 需要通过试验来确定。由此说明, 沥青混合料的中间主应力效应试验研究具有重要意义。

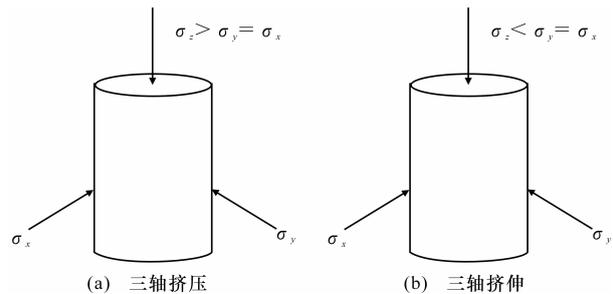


图 1 计算模型

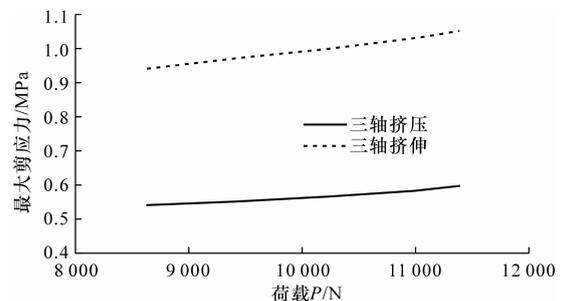


图 2 剪应力计算结果

## 2 沥青混合料中间主应力效应试验

### 2.1 沥青混合料

在试验研究中采用 SBSI-C 型改性沥青。试验中沥青混合料的类型采用 AC-16, 其合成级配见下页表 1。

### 2.2 试验设备

#### 2.2.1 试验设备组成

试验设备包括 SANS 多功能压力试验机和平应变试验装置。平面应变试验装置由 2 块厚 10 mm 的钢板、4 根螺杆和上下 2 个专用压头构成。钢板和螺杆用来限制试件在侧限方向上的变形, 压头的作用是在试件装配好后传递轴向压力。

#### 2.2.2 平面应变试验装置受力分析

刚性平面应变装置的刚度  $K_1$  可表示为

$$K_1 = \frac{F_1}{\Delta l_1} \quad (1)$$

$$E_1 = \frac{F_1 l}{\Delta l_1 A} \quad (2)$$

式中:  $F_1$  为试件作用于刚性平面应变装置的力;  $\Delta l_1$  为刚性平面应变装置的轴向变形量;  $E_1$  为刚性平面应变装置的弹性模量;  $l$  为试件的长度。

表1 矿料的合成级配

筛孔尺寸/mm	规范级配范围/%	筛孔通过率/%						合成级配/%
		9.5~16 mm	4.75~9.5 mm	2.36~4.75 mm	砂	石屑	矿粉	
19	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	90~100	95.95	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.54
13.2	76~92	64.24	100.00	100.00	96.99	100.00	100.00	86.77
9.5	60~80	9.05	99.12	100.00	94.47	100.00	100.00	66.37
4.75	34~62	0.21	35.54	97.32	86.67	100.00	100.00	46.13
2.36	20~48	0.00	3.78	10.24	78.97	84.56	100.00	27.63
1.18	13~36	0.00	1.84	3.41	68.33	70.38	100.00	23.30
0.6	9~26	0.00	0.00	1.59	41.28	56.75	100.00	17.53
0.3	7~18	0.00	0.00	0.00	11.25	43.49	99.50	11.92
0.15	5~14	0.00	0.00	0.00	3.95	30.22	95.00	8.98
0.075	4~8	0.00	0.00	0.00	2.16	16.17	78.10	6.04

试件与刚性平面应变装置互为作用,因此有

$$F_1 = F_2 \quad (3)$$

$$\sigma_{22}^1 A = \sigma_{22}^2 A \quad (4)$$

式中: $A$ 为试件横截面的面积; $F_2$ 为刚性平面应变装置作用于试件的力; $\sigma_{22}^1$ 、 $\sigma_{22}^2$ 分别为对应于 $F_1$ 、 $F_2$ 的应力。

假设平面应变装置的位移 $\Delta l_1$ 与试件在侧限方向的位移 $\Delta l_2$ 相等,则试件的应变 $\epsilon_{22}$ 为

$$\epsilon_{22} = -\frac{\Delta l_2}{l} \quad (5)$$

试件的应变用广义虎克定律表示为

$$\begin{aligned} \epsilon_{22} &= \frac{1}{E_2} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] - \\ \frac{\Delta l_1}{l} &= \frac{1}{E_2} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] - \\ \frac{\sigma_{22}^1}{E_1} &= \frac{1}{E_2} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] \\ \sigma_{22} &= \frac{1}{1 + E_2/E_1} \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{ij}$ 为应力分量; $\epsilon_{ij}$ 为应变分量, $i, j = 1, 2, 3$ ;  $\nu$ 为泊松比。

$E_1$ 约为200 GPa,其值远大于沥青混合料的模量 $E_2$ ,即 $E_1 \gg E_2$ ,式(6)可转化为

$$\sigma_{22} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}) \quad (7)$$

平面应变的条件为

$$\epsilon_{22} = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_{22} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}) \quad (9)$$

因此,可以认为试验基本达到平面应变的条件。

### 2.3 试验试件

确定试验中采用的试件形状和尺寸主要考虑以下因素。

(1)试件形状与中间主应力的关系。为了充分

考虑中间主应力变化对沥青混合料强度的影响,试验中试件的形状采用立方体。其原因是,从力学角度看,圆柱体受力状态为立方体的蜕化状态,换句话说,圆柱体侧面的应力为一个值,而立方体侧面的应力是2个值。它们之间的关系如图3所示,其中, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 分别为第一、第二、第三主应力。

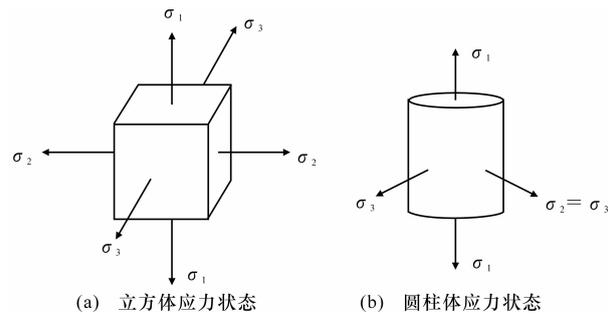


图3 单元体受力状态

(2)级配集料最大粒径。试验中级配集料的最大粒径为16 mm,按试验规程的要求,对轮碾板块试件,碾压层厚度不小于公称最大粒径的1.0~1.5倍,宽度或厚度不小于公称最大粒径的1.0~1.5倍,长度不小于公称最大粒径的4倍,所以确定试件的长度为50 mm。

(3)平面应变装置的尺寸。平面应变装置要求试件尺寸宜为50 mm。

综合考虑以上各因素,试验采用边长50 mm的立方体试件。

### 2.4 试验条件

沥青混合料的力学性能受加载速率、温度的影响较大,其性能指标与试验条件的关系极大。因此,温度间隔不宜过大,试验温度为15℃和25℃。综合考虑国内外沥青混合料试验规程的要求,确定加载速率为2 mm/min和5.08 mm/min<sup>[4-8]</sup>。

### 3 考虑交互作用的正交试验的显著性分析

选择  $L_8(2^7)$  表安排试验<sup>[9]</sup>。正交试验因子水平安排见表2;表头设计见表3;水平随机化处理后的正交设计见表4;试验方案与试验结果见表5;试验方差分析结果见表6。表6中显示,给定显著水平  $\alpha=5\%$  的  $F_{\alpha}(1,4)=7.71$ ;分析结果显示,A、B、C这3个因子的F值分别为340.742 1、41.429 1和24.465 55。这表明3个因子对沥青混合料的强度都有显著性影响,其影响的强弱次序为中间主应力、温度和加载速率。由此可知,中间主应力对沥青混合料强度的影响最为显著<sup>[10-11]</sup>。

表2 正交试验因子水平

因子水平	中间主应力(A)	试验温度(B)/ ℃	加载速率(C)/ (mm·min <sup>-1</sup> )
水平1	无	15	2.00
水平2	有	25	5.08

表3 表头设计

列号	1	2	3	4	5	6	7
因素	A	B	AB	C	AC	BC	

表4 水平随机化后的正交设计

试验号	列号						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	2	1	2	1	2
2	1	1	2	2	1	2	1
3	1	2	1	1	2	2	1
4	1	2	1	2	1	1	2
5	2	1	1	1	1	1	1
6	2	1	1	2	2	2	2
7	2	2	2	1	1	2	2
8	2	2	2	2	2	1	1

表5 试验方案与试验结果

试验号	列号							强度值/ MPa
	1	2	3	4	5	6	7	
	A	B	AB	C	AC	BC		
1	1	1	2	1	2	1	2	5.940
2	1	1	2	2	1	2	1	7.303
3	1	2	1	1	2	2	1	3.972
4	1	2	1	2	1	1	2	4.983
5	2	1	1	1	1	1	1	10.893
6	2	1	1	2	2	2	2	13.431
7	2	2	2	1	1	2	2	9.735
8	2	2	2	2	2	1	1	10.930

表6 试验方差分析(显著水平  $\alpha=0.05$ )

因素	离差平方和	自由度	均方离差平方和	F值	$F_{0.05}(1,4)$	$\alpha=0.05$
中间主应力	64.928 71	1	64.928 71	340.742 1	7.71	显著
试验温度	7.894 351	1	7.894 351	41.429 1		显著
加载速率	4.661 931	1	4.661 931	24.465 55		显著

### 4 结 语

(1)闭式三轴试验对应的力学分析表明,三轴拉伸的最大剪应力明显高于三轴挤压的最大剪应力,这种计算结果的差别是由中间主应力的不同而引起的;为了研究沥青混合料的中间主应力效应,设计了平面应变试验装置,并对其进行力学分析,结果表明,试验基本达到平面应变的条件。

(2)确定试验中采用试件的形状和尺寸主要考虑3个因素,分别为试件的形状与中间主应力的关系、级配集料最大粒径和平面应变装置的尺寸;综合考虑以上因素,确定试验采用边长50 mm的立方体试件;沥青混合料的力学性能受加载速率、温度的影响较大,综合考虑国内外沥青混合料试验规程的要求,确定试验温度值为15℃和25℃,确定试验加载速率为2 mm/min和5.08 mm/min。

(3)考虑中间主应力、加载温度与加载速率3个因素,设计了正交试验。试验方差分析结果表明,对于给定显著水平  $\alpha=5\%$ ,3个因素对沥青混合料强度都有显著性影响,其中,中间主应力对沥青混合料强度的影响最为显著,温度对沥青混合料强度的影响次之,加载速率对沥青混合料强度也有显著性影响,但在3个因素中最弱。

(4)沥青混合料中的大部分材料是不同粒径的粗细集料和矿粉颗粒,其颗粒性特征主要表现在材料的力学特性与三轴试验的围压有关;在规定的试验条件下,沥青混合料的强度随着中间主应力的增大而增大。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] JTJ 052—2000,公路沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [2] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].
- [3] 俞茂宏.工程强度理论[M].北京:高等教育出版社,1999.