

文章编号:1671-6833(2012)01-0006-05

# 应力吸收层贯入试验数值分析与试验方法评价

周 燕<sup>1</sup>,李美东<sup>1</sup>,苑瑞星<sup>2</sup>,陈拴发<sup>3</sup>

(1.天津城市建设学院 土木工程系,天津 300384; 2.霍尼韦尔综合科技(中国)有限公司,上海 201203;

3.长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**为了评价应力吸收层沥青混合料的抗剪性能,对应力吸收层沥青混合料进行了不同温度下抗压回弹模量试验和贯入试验的数值分析,分析了试件规格、压头大小、矿料级配等对试验结果的影响。根据数值分析和室内试验结果,验证了应力吸收层沥青混合料贯入试验的可行性,得到适宜的试验条件。分析表明:采用直径和高度均为100 mm的圆柱形静压试件和直径19 mm的压头进行贯入试验时,试验数据稳定,可有效区分应力吸收层矿料级配的优劣。研究成果为应力吸收层沥青混合料的质量评价提供了理论和试验依据。

**关键词:**应力吸收层;沥青混合料;贯入试验;数值分析;试验方法

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.002

## 0 引言

应力吸收层沥青混合料因具有低弹性模量、高韧性、材料密实、良好的弹性恢复性能、优良的抗疲劳性能等特点,可以缓解裂缝尖端的应力集中、延缓或抑制反射裂缝的发展<sup>[1-4]</sup>,延长沥青混凝土罩面层的服役寿命<sup>[5-7]</sup>。由于应力吸收层位于接缝(或裂缝)端部,夏季高温时,在荷载作用下也会受到较大的剪应力作用,因此研究应力吸收层沥青混合料的抗剪性能,保证其上罩面层不出现车辙等破坏具有重要的现实意义。许多文献<sup>[8-10]</sup>提出了沥青混合料的抗剪试验方法,但试验复杂,数据处理困难。应力吸收层沥青混合料,由于集料细、沥青用量大、对温度变化敏感等原因,相关的抗剪试验方法还处于摸索阶段。鉴于此,笔者采用贯入试验来模拟裂缝尖端应力吸收层的受力状态,研究试件规格、压头大小、矿料级配等对试验结果的影响,讨论应力吸收层沥青混合料贯入试验的可行性及适宜的试验条件。

## 1 试验方法

### 1.1 抗压回弹模量

抗压回弹模量反映了材料的弹性变形和弹性

滞后变形。为满足计算及路面设计要求,首先确定应力吸收层沥青混合料的抗压回弹模量。试验采用单轴压缩试验方法,加载速率均采用2 mm/min,圆柱体试件的直径为100 mm,高为100 mm,在设计级配的最佳沥青用量下,分别测试了5, 15, 20, 45, 60 °C温度下的抗压回弹模量,试验结果如表1所示。

随温度的升高,试件抗压回弹模量减小;在各温度条件下,应力吸收层混合料抗压回弹模量较一般沥青混合料小。如15 °C条件下,普通细粒式密级配沥青混合料抗压回弹模量约为2 000 MPa<sup>[11]</sup>,应力吸收层混合料抗压回弹模量仅为527.4 MPa,约为普通沥青混合料的0.26倍。表1为贯入试验的数值模拟提供了试验依据。

### 1.2 贯入试验

贯入试验是通过一个钢压头在试件上加压,模拟裂缝尖端应力吸收层的受力状态,试验方法如图1所示。

加载钢压头的直径应远小于试件的直径,用 $r/R$ 表示压头和试件直径的比例。从路面的实际受力角度, $r/R$ 越小越可以模拟应力吸收层的实际受力状态,但是压头太小试验数据会出现较大的变异性,同时压头的大小还受集料尺寸的影响。

收稿日期:2011-08-08;修订日期:2011-10-13

基金项目:国家西部交通建设科技资助项目(200631800005)

作者简介:周燕(1979—),女,山东临沂人,天津城市建设学院讲师,博士,主要从事路面材料与结构的科研与教学工作。

表 1 抗压回弹模量试验结果

Tab.1 Compression rebound modulus test results

试件毛体 积密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙 率/%	试验 温度/ ℃	抗压回 弹模量/ MPa	抗压回 弹模量 平均值 /MPa
2.316	1.47	60	142.0	
2.314	1.56	60	139.8	142.4
2.318	1.39	60	145.3	
2.316	1.47	45	210.2	
2.310	1.73	45	200.2	203.9
2.312	1.65	45	201.4	
2.317	1.43	20	505.7	
2.315	1.52	20	488.9	490.8
2.313	1.60	20	477.9	
2.309	1.77	15	526.1	
2.315	1.52	15	543.9	527.4
2.317	1.43	15	512.3	
2.311	1.69	5	710.8	
2.303	2.03	5	673.7	711.8
2.313	1.60	5	750.9	



图 1 贯入试验方法

Fig.1 Penetration test

应力吸收层沥青混合料最大公称粒径为 4.75 mm,所以压头的直径不可过大.选择 4 倍于最大公称粒径的压头直径 19 mm 和 6 倍于最大公称粒径的压头直径 28.5 mm 进行 ANSYS 计算分析.同时,为了试验操作方便,选择静压圆柱形试件直径和高均为 100 mm 和马歇尔试件(100 mm × 63.5 mm)进行试验的数值模拟,计算荷载为实际试件的破坏力.抗压回弹模量取 500 MPa,泊松比取 0.25.

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 圆柱形试件与 $\Phi 28.5$ mm 压头

直径和高均为 100 mm 的圆柱形试件在直径

为 28.5 mm 的压头作用下,各主应力及剪应力沿试件表面分布的路径图如图 2~3 所示.

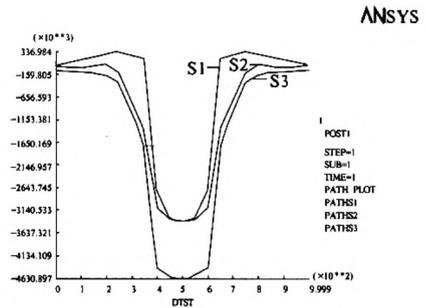


图 2 各主应力沿表面分布的路径图

Fig.2 Stress distribution along the surface

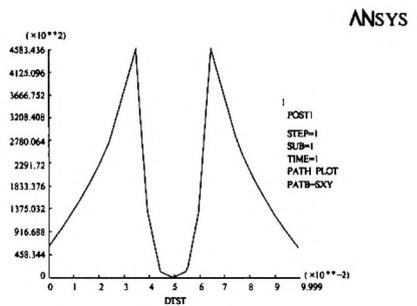


图 3 剪应力沿表面分布的路径图

Fig.3 Shear stress distribution along the surface

第一主应力、第三主应力在压头范围内最大,第三主应力约为第一主应力的 1.4 倍.各主应力最大值在试件中心处,剪应力最大值出现在压头边缘处.无论是第一主应力、第三主应力还是剪应力,在试件外边缘处应力均达到最小值,第一主应力约为最大值的 0.1 倍,第三主应力约为最大值的 0.005 倍,但剪应力约为最大值的 0.3 倍,说明试件直径为 100 mm 时,直径 28.5 mm 的压头偏大,试件不能满足横向支撑.

为研究试件高度是否满足应力分布的范围,图 4~5 给出了各应力沿试件纵向的分布路径图.其中,第一主应力和第三主应力取试件的中心处,而剪应力取压头边缘最大剪应力处.

可以看出,各主应力在距离表面 70 mm 左右达到稳定值,剪应力在距离表面 60 mm 左右收敛,可见在直径 28.5 mm 的压头作用下,试件高度可满足应力的纵向分布.

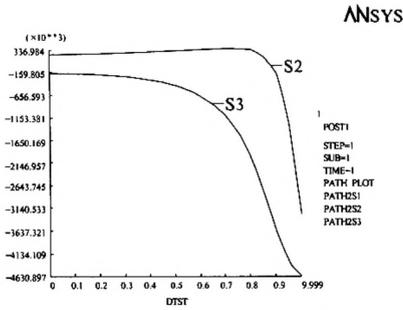


图4 各主应力竖向分布路径图

Fig. 4 Vertical dispersion of stress distribution

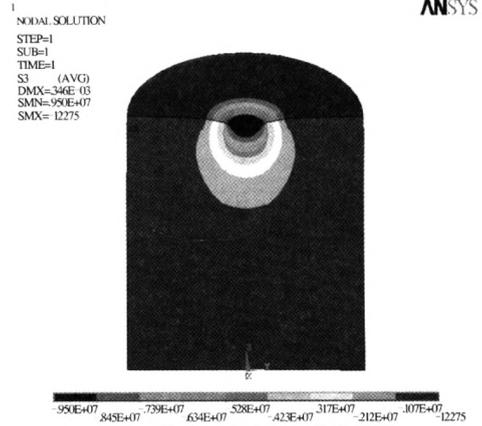


图7 第三主应力竖向分布云图

Fig. 7 Vertical dispersion of the third principal stress

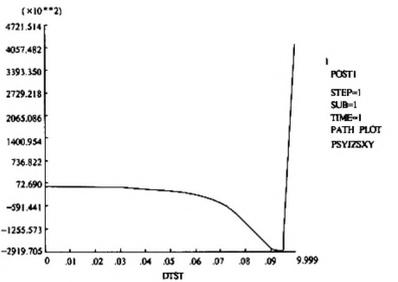


图5 最大剪应力竖向分布路径图

Fig. 5 Vertical dispersion of maximum shear stress

### 2.3 100 mm × 63.5 mm 圆柱形试件与 $\Phi 28.5$ mm 压头实验研究

由以上研究可以看出,横向主要考虑剪应力是否超出试件直径范围;纵向主要考虑第三主应力是否超出试件的高度范围,所以对 100 mm × 63.5 mm 圆柱形试件仅列出剪应力横向分布云图与第三主应力沿试件中心纵向的分布云图,分别如图 8、9 所示。

### 2.2 直径和高均为 100 mm 的圆柱形试件与 $\Phi 19$ mm 压头实验研究

图 6 为剪应力俯视云图,图 7 为第三主应力竖向分布云图。试件表面边缘处的第三主应力约为中心处最大值的 0.1 倍,试件表面边缘处的剪应力约为压头边缘处最大值的 0.1 倍,可见  $\Phi 100$  mm 的试件足以满足各作用力的横向分布。由图 7 可以看出,试件底部边缘第三主应力约为最大值的 0.1 倍,可见高度 100 mm 足以提供纵向支撑。

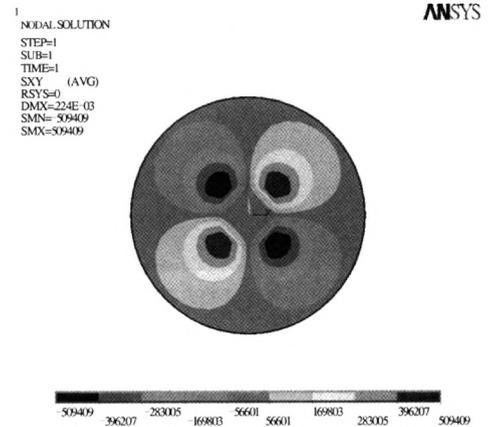


图8 剪应力俯视云图

Fig. 8 Top view of shear stress

由图 8 和图 9 可以看出,试件边缘处剪应力为压头边缘最大剪应力的 0.1 倍,满足横向支撑;纵向到底部边缘第三主应力约为最大主应力的 0.2 倍,高度不满足纵向的支撑。

### 2.4 100 mm × 63.5 mm 圆柱形试件与 $\Phi 19$ mm 压头实验研究

100 mm × 63.5 mm 圆柱形试件在  $\Phi 19$  mm 压头作用下剪应力横向分布云图与第三主应力沿试件中心纵向的分布云图分别如图 10、11 所示。

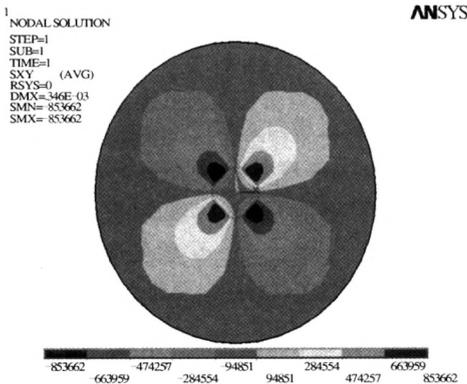


图6 剪应力俯视云图

Fig. 6 Top view of shear stress

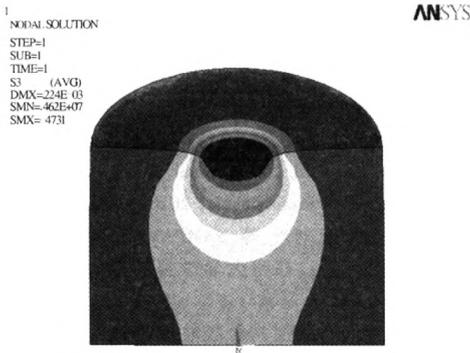


图 9 第三主应力竖向分布云图

Fig. 9 Vertical dispersion of the third principal stress

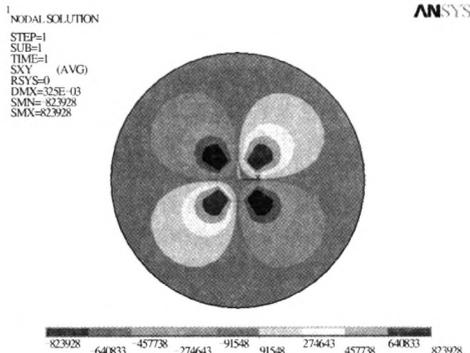


图 10 剪应力俯视图

Fig. 10 Top view of shear stress

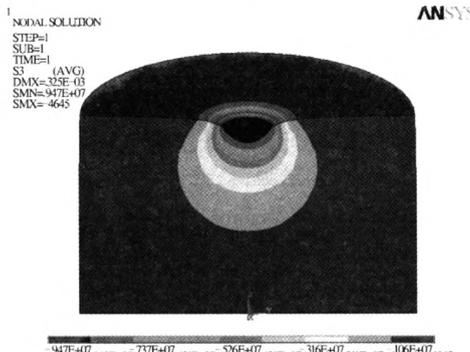


图 11 第三主应力竖向分布云图

Fig. 11 Vertical dispersion of the third principal stress

由图 8、9 可以看出,试件边缘处剪应力仍为压头边缘最大剪应力的 0.1 倍;纵向底部边缘处第三主应力约为最大主应力的 0.1 倍;说明在  $\Phi 19$  mm 压头作用下高度为 63.5 mm 的试件完全满足纵向支撑。

综上所述,在  $\Phi 19$  mm 压头的作用下,两种试件均可满足横向和纵向的支撑;在  $\Phi 28.5$  mm 压

头的作用下,马歇尔试件不满足纵向支撑,圆柱形试件不满足横向支撑。

另外,由于应力吸收层沥青混合料最大粒径偏小,在马歇尔击实仪作用下不可避免地存在粒径被压碎的情况,所以宜选择静压法成型的直径和高均为 100 mm 的圆柱形试件和  $\Phi 19$  mm 的压头进行试验研究。

### 3 试验方法评价

为了加强对比结果,选择 7 种代表性改性沥青,如:SBR 改性、SBS 改性、SAM 改性、QP 改性、GC 改性、TPS 改性以及 STR 改性沥青,进行混合料贯入试验。其中,试件采用第 2 节的圆柱形试件,压头直径为 19 mm。矿料级配对混合料的高温抗剪能力有较大的影响,对设计级配、级配上限和级配下限分别进行 7 种改性沥青的贯入试验。3 种级配、7 种沥青样品下的贯入试验破坏荷载如图 12 所示:

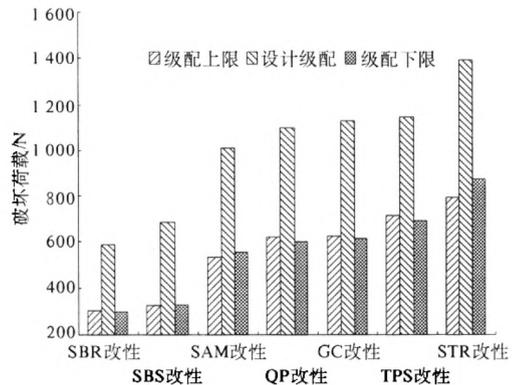


图 12 级配类型对贯入破坏荷载的影响

Fig. 12 Effect of gradation type on penetration failure load

可以看出,在级配上限和级配下限时,混合料的破坏荷载明显偏小。一方面说明设计的级配颗粒比较均匀,沥青用量合理,混合料具有较好的内摩阻力和粘聚力;另一方面也说明:在设计的圆柱形试件和压头作用下,贯入试验方法可以较好地区分矿料级配的优劣,数值模拟和实际试验方法相吻合,圆柱形试件尺寸和压头尺寸选择较为合理。

### 4 结论

(1)各温度条件下,应力吸收层混合料抗压回弹模量较一般沥青混合料小,15℃条件下的抗

压回弹模量约为普通细粒式密级配沥青混合料的0.26倍。

(2) 计算分析表明,  $\Phi 19$  mm 压头和  $\Phi 28.5$  mm 压头分别作用在静压法成型的试件和马歇尔试件上时, 各主应力最大值出现在试件中心处, 剪应力最大值出现在压头边缘处。在  $\Phi 19$  mm 压头的作用下, 马歇尔试件和静压圆柱形试件均可满足横向和纵向支撑; 在  $\Phi 28.5$  mm 压头的作用下, 马歇尔试件不满足纵向支撑, 静压圆柱形试件不满足横向支撑。应力吸收层沥青混合料贯入试验推荐采用  $\Phi 19$  mm 压头和静压法成型的高和直径均为 100 mm 的圆柱形试件。

(3) 用室内试验检验了设计圆柱形试件和压头对贯入试验的可行性。结果表明: 贯入试验方法可以较好地地区分矿料级配的优劣, 数值模拟和实际试验方法相吻合, 贯入试验可用于应力吸收层沥青混合料抗剪性能的评价。

#### 参考文献:

- [1] CHEN D H, BILYEU J, SCULLION T. Lessons learned on jointed concrete pavement rehabilitation strategies in Texas [J]. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(3): 257-264.
- [2] KIM J, BUTTLAR W G. Analysis of reflective crack

control system involving reinforcing grid over [J]. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 2002, 128(4): 375-383.

- [3] ZHOU Yan, CHEN Shuan-fa, CHEN Hua-xin, et al. Design method of SAMPAVE asphalt mixture [C]. Beijing: The 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals, 2010, 3890-3898.
- [4] 周燕, 陈拴发, 刘丹, 等. SAMPAVE 沥青混合料级配设计研究 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2010, 31(1): 30-33.
- [5] 周燕. 应力吸收层结合料性能及其关键评价指标研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2010.
- [6] 周燕. SAMPAVE 抗裂结构层材料及其路用性能研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2007.
- [7] DEMPSEY B J. Development and performance of interlayer stress-absorbing composite in asphalt concrete overlays [J]. *Transportation Research Board of the National Academies*, 2002(1809): 175-183.
- [8] 毕玉峰. 沥青混合料抗剪试验方法及抗剪参数研究 [D]. 上海: 同济大学道路与交通工程系, 2004.
- [9] 王哲人, 曹建新, 王龙, 等. 级配碎石混合料的动力变形特性 [J]. *中国公路学报*, 2003(1): 22-26.
- [10] 栗培龙. 沥青混合料粘弹性力学参数及其应用研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2009.
- [11] 程毅. 设置应力吸收层的旧混凝土路面沥青加铺层结构研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2006.

## Numerical Analysis and Test Method Evaluation of Penetration Test of Stress Absorbing Layer

ZHOU Yan<sup>1</sup>, LI Mei-dong<sup>1</sup>, YUAN Rui-xing<sup>2</sup>, CHEN Shuan-fa<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China; 2. Honeywell Technology Solutions (China) Co. Ltd., Shanghai 201203, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** For evaluating the shear property of stress absorbing layer asphalt mixture, compression rebound modulus test under different temperatures and numerical analysis were conducted. The influence of test conditions such as specimen size and head size and mineral aggregate gradation were discussed. And then the feasibility and appropriate test conditions of penetration test were proposed based on the numerical analysis and test results. The results show that: with 100mm diameter and 100mm height static pressure cylindrical specimens and 19mm diameter pressure head, the test data is stable and can effectively distinguish mineral aggregate gradation of stress absorbing layer. Conclusion provides theoretical and test basis for quality control of stress absorbing layer asphalt mixture.

**Key words:** stress absorbing layer; asphalt mixture; penetration test; numerical analysis; test method