

基于 Abaqus 沥青混合料 SCB 试验参数敏感性分析

蔡广聪

(广西交通职业技术学院, 广西 南宁 530023)

摘要:为了分析半圆弯曲试验(SCB)对试件尺寸和加载条件的敏感性,设计正交试验,采用 Abaqus 软件建立半圆试件受力模型,分析试件厚度、切口深度、切口宽度、支点间距等因素对半圆试件抗拉应力的影响。试验结果表明:采用极差分析法和方差分析法分析带切缝的半圆弯曲试件拉应力敏感性,各因素对拉应力影响程度依次为支点间距>切缝宽度>试件厚度>切缝深度。在进行半圆弯曲试验时,试件制作过程中要控制切缝宽度的影响,在加载过程中要控制好支点间距。试验最优参数为:试件厚度 50 mm,切缝深度和宽度分别为 15、1.6 mm,支点间距与直径比为 0.8。

关键词: 道路工程; 半圆弯曲试验; Abaqus 分析; 断裂性能

1 引言

沥青混凝土是道路建设中最常用的路面材料之一,对其性能研究是改善沥青路面路用性能的基础。沥青路面在车辆荷载和温度应力影响下,会导致半刚性基层产生裂缝,该裂缝在荷载和温度作用下由下往上逐步发展,引起沥青面层开裂,形成反射裂缝,严重影响了道路行车安全性和舒适性。

小梁弯曲试验和间接拉伸试验被广泛用于研究沥青混合料断裂性能,随着研究的深入,研究者逐渐意识到沥青路面的实际受力状况有别于小梁弯曲试验的三点(或四点)受力情况,且对已建成路面进行小梁试件取样比较复杂,采用小梁试件评价建成道路断裂性能存在一定局限性。近年来,一种全新的试验方法被用于沥青混合料性能研究中,即半圆弯曲试验(SCB)。半圆弯曲最早被用于研究岩石的断裂性能,后来被引入沥青混合料的疲劳性能和断裂性能研究中,并结合有限元分析得到了 SCB 试验抗拉强度公式。沥青混合料属于弹塑性材料,抗拉强度并不能完整表征其力学性能,研究者采用带缺口的半圆试件进行 SCB 试验,引入断裂韧度和应力强度因子,可以较好地分析沥青混合料弹塑性断裂韧度。研究发现:SCB 试验结果与沥青混合料路面受力特征相关性较高,半圆试件受力更接近路面受力状况。半圆试件来源广泛,室内试验可通过旋转压实或马歇尔试验制备的试件切割而

成,且研究发现两种成型方式得到的半圆试件力学性能相同。对于已建成路面,可采用现场钻芯试件切割而成,因该方式获得的半圆试件性能与实际道路性能接近,因此该方法倍受研究者青睐。此外,刘宇等采用 SCB 试验测量沥青混合料动态模量主曲线,并对对比分析了不同测试方法的动态模型转换方程。

采用带切缝的半圆试件可近似模拟沥青路面反射裂缝在荷载作用下的发展过程,同时可根据试验结果,采用断裂韧度和应力强度因子对沥青混合料进行弹塑性分析。在 SCB 试验中,为了得到较好的力学响应,试件制作过程中需控制好试件厚度、切缝宽度、深度和加载时支点间距等因素,该文采用 Abaqus 建模分析不同因素下半圆试件抗拉强度,根据正交试验,确定 SCB 试验对各因素的敏感性,以便为室内 SCB 试验提供一定参考。

2 试验理论与方法

2.1 正交试验设计

正交试验是在大量实践的基础上总结出来的一种科学的试验设计方法,是某一评价指标对影响该指标变化的各个因素敏感性分析的常用方法,正交设计是一组规格化的正交表,通过合理设置试验方案,可以达到以部分试验结果表征全面试验结果的效果,且很大程度缩减了试验量。为了分析试件厚度、切缝深度、切缝宽度和支点间距对沥青混合料 SCB 试件拉应力的

影响程度,采用正交表(L₂₅5⁶)设计正交试验,正交试验设计方案及试验结果如表 1 所示。

表 1 正交试验设计试验方案(L₂₅5⁶)及试验结果

试验号	试件厚度(A)		切缝深度(B)		切缝宽度(C)		支点间距(D)		不安排	不安排	拉应力/ kPa
	水平	厚度/mm	水平	深度/mm	水平	宽度/mm	水平	间距/mm	E	F	
1	1	35	1	5	1	1.0	1	105.0	1	1	1.592
2	1	35	2	10	2	1.2	2	112.5	2	2	1.689
3	1	35	3	15	3	1.4	3	120.0	3	3	1.905
4	1	35	4	20	4	1.6	4	127.5	4	4	1.908
5	1	35	5	25	5	1.8	5	135.0	5	5	1.698
6	2	40	1	5	2	1.2	3	120.0	4	5	1.893
7	2	40	2	10	3	1.4	4	127.5	5	1	1.987
8	2	40	3	15	4	1.6	5	135.0	1	2	1.889
9	2	40	4	20	5	1.8	1	105.0	2	3	1.739
10	2	40	5	25	1	1.0	2	112.5	3	4	1.652
11	3	45	1	5	3	1.4	5	135.0	2	4	1.804
12	3	45	2	10	4	1.6	1	105.0	3	5	1.789
13	3	45	3	15	5	1.8	2	112.5	4	1	1.811
14	3	45	4	20	1	1.0	3	120.0	5	2	1.917
15	3	45	5	25	2	1.2	4	127.5	1	3	1.978
16	4	50	1	5	4	1.6	2	112.5	5	3	1.892
17	4	50	2	10	5	1.8	3	120.0	1	4	2.115
18	4	50	3	15	1	1.0	4	127.5	2	5	1.818
19	4	50	4	20	2	1.2	5	135.0	3	1	1.817
20	4	50	5	25	3	1.4	1	105.0	4	2	1.918
21	5	55	1	5	5	1.8	4	127.5	3	2	1.825
22	5	55	2	10	1	1.0	5	135.0	4	3	1.729
23	5	55	3	15	2	1.2	1	105.0	5	4	1.892
24	5	55	4	20	3	1.4	2	112.5	1	5	1.905
25	5	55	5	25	4	1.6	3	120.0	2	1	2.055
K ₁		8.792	9.006		8.708		8.93		9.479	9.262	
K ₂		9.160	9.309		9.269		8.949		9.105	9.238	
K ₃		9.299	9.315		9.519		9.885		8.988	9.243	
K ₄		9.560	9.286		9.533		9.516		9.259	9.371	
K ₅		9.406	9.301		9.188		8.937		9.386	9.103	
U ₁		1.758	1.801		1.742		1.786		1.896	1.852	
U ₂		1.832	1.862		1.854		1.790		1.821	1.848	
U ₃		1.860	1.863		1.904		1.977		1.798	1.849	
U ₄		1.912	1.857		1.907		1.903		1.852	1.874	
U ₅		1.881	1.860		1.838		1.787		1.877	1.821	
极差		0.154	0.062		0.165		0.189		0.076		
较优值		A4	B3		C4		D3				

2.2 有限元模型分析

带切缝的半圆试件在切缝尖端应力较为集中,受力情况复杂,现有研究中对带切缝半圆试件底部拉应力分析还未形成统一的求解公式,对无缺口的半圆试件,研究中给出了支点间距为 $0.8D$ (D 为试件直径) 时的底部拉应力计算公式:

$$\sigma = \frac{AP}{tD}$$
(1)

式中: σ 为底部拉应力(MPa); P 为作用荷载(N); t 为试件厚度(mm); D 为试件直径(mm); A 为拟合系数,R. Hofmand 等给出的应力系数为 4.263,Molenaar 等给出的系数为 4.8,刘宇等给出的系数为 4.888。

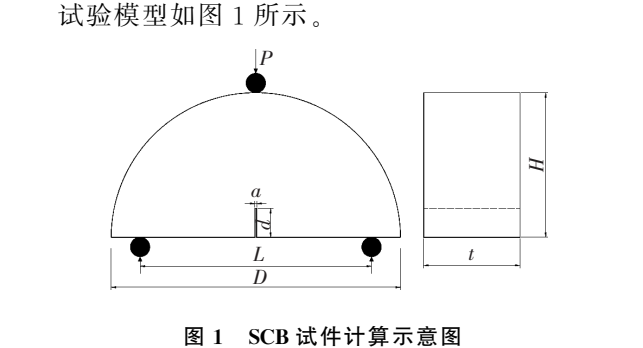


图 1 SCB 试件计算示意图

对该文有限元模型进行验证,求得试件底部拉应力与理论拉应力如表 2 所示。

表 2 计算结果比较

计算方法	底部拉应力/MPa	绝对误差/MPa	相对误差/%
R. Hofmand,等	0.170	0.015	8.1
Molenaar,等	0.192	0.007	3.8
刘宇,等	0.196	0.011	5.9
该文	0.185		

由表 2 可知:该文模型分析结果与现有研究结果绝对误差最大值为 0.015 MPa,相对误差最大值为 8.1%,可认为该有限元模型分析是正确的。

采用 Abaqus 软件分析试件厚度、切缝深度、切缝宽度和支点间距等因素对带切缝的 SCB 试件底部拉应力的影响程度,取半圆试件模型直径为 150 mm,分析时弹性模量取 1 200 MPa,泊松比为 0.3,模型网格划分如图 2 所示。

3 试验结果分析

对正交试验结果分析,主要采用极差分析(直接分

析)和方差分析。

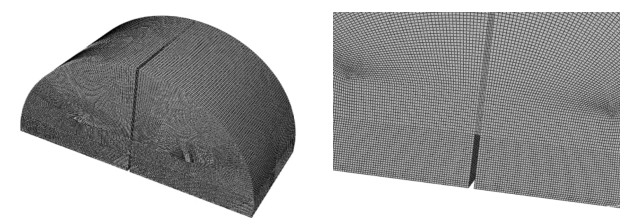


图 2 网格划分

3.1 直接分析法

极差 k 是同一水平各因素中平均值的最大与最小值之差,即 $(U_{\max} - U_{\min})$,该值越大,表示在这个范围内造成的差别越大,敏感性越高,该因素是主要影响因素,反之则是次要影响因素。正交试验极差分析结果示于表 1。

从表 1 可知:① 各因素极差值大小为 $R_D > R_C > R_A > R_B$,说明 4 个因素对 SCB 试件拉应力的影响程度由大到小依次是:支点间距>切缝宽度>试件厚度>切缝深度;② E 和 F 空列的极差代表试验误差,将两列的极差之和求其平均值(0.076)。试验中某列的极差小于空列极差,则可认为该列对试验指标的影响极小,如该试验中切缝深度极差小于空列极差,可认为切缝深度对 SCB 试件拉应力无影响。当试验条件为:试件厚度为 50 mm(A4),切缝深度为 15 mm(B3),切缝宽度为 1.6 mm(C4)和支点间距为 120 mm(D3)时,底部拉应力最大,试验结果最优。

3.2 方差分析

方差分析(ANOVA)法采用一系列的数字化计算来表示试验因素和误差的影响大小,核心是将试验数据间的总波动 S_T 分解为两部分:① 是因素水平变化引起的数据波动 S_A, S_B, \dots ;② 是试验误差引起的数据波动 S_e 。正交试验方差分析中,令:

$$P = \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n x_i)^2$$
(2)

$$R = \sum_{i=1}^n x_i^2$$
(3)

$$Q_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^m K_{jk}^2$$
(4)

则有:

$$SS_j = Q_j - p$$
(5)

$$SS_T = R - p$$
(6)

$$SS_e = SS_T - \sum_{j=1}^m SS_j$$
(7)

式中: P 为试验数据总和的平方除以试验总次数; R 为

试验结果平方和; Q_j 为 j 因素在各水平时试验结果总和的平方和除以该水平的试验次数; SS_j 为 j 因素各水平间的数据误差; SS_T 为总方差; SS_e 为试验误差; n 为试验总次数; x_i 为第 i 次试验结果; k 为试验水平。

根据试验结果,计算多因素方差分析表如表 3 所示。 $F_{0.05}(4,8)=3.84,F_{0.01}(4,8)=7.01;F_{0.25}(4,8)=1.66$ 。

表 3 多因素方差分析表

项目	平方和	自由度	方差	F	显著性
试件厚度(A)	0.068 1	4	0.017 0	3.460	(*)
切缝深度(B)	0.014 2	4	0.003 5	0.721	
切缝宽度(C)	0.090 0	4	0.022 5	4.574	*
支点间距(D)	0.152 9	4	0.038 2	7.770	**
试验误差 e	0.039 4	8	0.004 9		
总和 SS_T	0.364 6	24			

从表 2 可知:除切缝深度外,各因素对 SCB 试件拉应力影响较大,其中支点间距影响最大,切缝宽度次之,随后是试件厚度,方差分析认为试验时应控制对显著因素的选择,非显著因素原则上可以选在试验范围的任意一点。经过方差分析法与极差分析法对比,其结果一致,试验误差为 0.46%。试验精度较高。

4 结 论

为了分析 SCB 试件对试件厚度、切缝深度、切缝宽度和支点间距的敏感性,采用 Abaqus 软件通过正交试验对各因素定量分析,得到以下结论:

(1) 对比该文有限元分析结果与现有无缺口半圆试件底部拉应力分析结果,得到绝对误差最大值为 0.015 MPa,相对误差最大值为 8.1%。故有限元模型分析是可靠的。

(2) 采用极差分析法和方差分析法分析带切缝的 SCB 试件拉应力敏感性,各因素对拉应力影响程度依次为:支点间距>切缝宽度>试件厚度>切缝深度。方差分析的试验误差为 0.46%,说明数值分析精度较高。

(3) 极差分析和方差分析结果表明:在进行 SCB

试验时,试件制作过程中要控制切缝宽度的影响,在加载过程中要控制好支点间距。当试验参数为试件厚度 50 mm,切缝深度 15 mm,切缝宽度 1.6 mm,支点间距与试件直径比为 0.8 时,半圆试件底部拉应力最大,试验结果最优。

参考文献:

[1] Krans R, Tolman F, Van de Ven M F C. Semicircular Bending Test: A Practical Crack Growth Test Using Asphalt Concrete Cores [C]. 3th RILEM Conference on Reflective Cranking in Pavements, Maastricht, 1996:123—133.

[2] Ven M V D, Smit A, Krans R. Possibilities of a Semi-circular Bending Test [C]. Eighth International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, Washington, 1997:939—950.

[3] Huang B, Xiang S. Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strength Tests for HMA Mixtures [C]. Advances in Pavement Engineering, 2005:1—12.

[4] 付欣, 刘秋, 陈拴发. 基于 ANSYS 的带切缝半圆弯曲试验参数分析 [J]. 公路交通科技, 2012(2).

[5] Eerkens S, Molenaar A, Scappas A. Abetter under Standing of Asphalt Concrete Response [C]. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference. Washington, University of Washington, 2003.

[6] 吕光印, 郝培文, 庞立果, 等. 沥青混合料半圆弯曲试验力学特性数值分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2008(3).

[7] 刘宇, 张肖宁. 沥青混合料半圆弯拉强度与间接拉伸强度对比分析 [J]. 公路交通技术, 2011(3).

[8] 刘宇. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料动态响应及断裂性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2009.

[9] Hofman R. Semi-Circular Bending Test to Assess the Resistance Against Crack Growth [C]. International Rilem Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 2003 :257—263.

[10] Molenaar J. Resistance to Crack-Growth and Fracture of Asphalt Mixture [C]. International Rilem Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, 2003: 618—625.

[11] 刘宇, 张肖宁, 迟凤霞. 国外 SCB(半圆弯拉)试验方法在沥青混合料中的研究与应用 [J]. 中外公路, 2008(3).