

基于黏聚区模型的沥青混凝土 SCB 试验模拟分析

周正峰^{1,2}, 唐虎城^{1,2}, 欧信旺^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 成都 610031)

摘要: 为了揭示沥青混凝土的开裂特性, 基于有限元软件 ABAQUS, 采用双线性黏聚区模型对沥青混凝土半圆弯曲试验进行模拟, 将模拟得到的荷载-线位移曲线与试验结果进行对比以验证黏聚区模型在开裂分析中的适用性, 进一步分析半圆弯曲试件在开裂过程中的内部应力分布、系统能量平衡和断裂性能参数, 以及黏聚区模型参数对试件荷载-线位移的影响。结果表明: 双线性黏聚区模型在沥青混凝土开裂分析中具有良好适用性; 在加载过程中半圆弯曲试件经历了弹性、损伤和断裂阶段, 裂纹失稳扩展点并非对应峰值载荷, 采用峰值载荷计算断裂韧度结果将会偏大, 少部分断裂功会转换为试件未开裂区域的弹性应变能, 采用断裂功计算断裂能结果也将会偏大; 半圆弯曲试件开裂过程中所能承受的峰值载荷主要取决于沥青混凝土抗拉强度而非断裂能。

关键词: 道路工程; 沥青混凝土; 半圆弯曲试验; 黏聚区模型; 断裂; 数值模拟

中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3955-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240325

Simulation analysis on SCB test of asphalt concrete using cohesive zone model

ZHOU Zheng-feng^{1,2}, TANG Hu-cheng^{1,2}, OU Xin-wang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Highway Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To explore the cracking characteristics of asphalt concrete, a finite element software ABAQUS was employed to simulate the semi-circular bend (SCB) test of asphalt concrete using a bilinear cohesive zone model (CZM). The simulated load-load line displacement curve was compared with the experimental result to validate the applicability of the CZM in cracking analysis. Based on this, the internal stress distribution, system energy balance, fracture behavior parameters during the cracking process of the SCB specimen, and the effects of cohesive zone model parameters on the load-load line displacement of the specimen were analyzed. The results indicate that the bilinear CZM has good applicability in cracking analysis of asphalt concrete. During the loading process, the SCB specimen undergoes elastic, damage, and fracture stages. The point of instability of crack propagation does not correspond to the peak load,

收稿日期: 2024-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52578535); 四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0169).

作者简介: 周正峰(1981-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 道路与机场工程. E-mail: zhouzf126@126.com

leading to an overestimation of fracture toughness when calculated using the peak load; a portion of the fracture work converts into elastic strain energy in the uncracked region of the specimen, resulting in an overestimation of fracture energy when calculated using fracture work. The peak load that the SCB specimen can withstand during the cracking process mainly depends on the tensile strength of asphalt concrete rather than fracture energy.

Key words: road engineering; asphalt concrete; semi-circular bend test; cohesive zone model; fracture; numerical simulation

0 引言

沥青混凝土的低温抗裂性能是影响冬季低温地区沥青路面开裂的重要因素。在设计沥青混合料时,常用的低温抗裂性能评价方法有间接拉伸试验、低温弯曲试验、半圆弯曲试验(Semi-circular bend test, SCB)和圆盘拉伸试验等。各种试验方法要求的仪器设备、试件形式、测试条件以及测试指标有所不同, Wagoner 等^[1,2]、Radeef 等^[3]、Meng 等^[4]比较了各种试验方法评价沥青混凝土抗裂性能的优缺点。在这些低温抗裂性能评价试验中, SCB 试验试件可来源于实验室或实地取芯,易于制作且测试简单,能够获得最大载荷、断裂韧度和断裂能等表征抗裂性能的直观指标,已广泛应用于沥青混凝土抗裂性能的研究。

李萍等^[5]、罗培峰^[6]、陈巧巧等^[7]通过 SCB 试验,分析沥青混凝土组成等因素对其抗裂性能的影响。冯德成等^[8]基于 SCB 试验,对现场取样的沥青混凝土断裂能、断裂韧度和刚度等指标进行了测试分析。姜鑫龙等^[9]也通过 SCB 试验,分析了应力强度因子等5个断裂指标评价沥青混凝土低温抗裂性能的适应性。Vega 等^[10]基于 SCB 试验,发现试样厚度对应力强度因子没有影响,而对断裂能有显著影响。Mobasher 等^[11]、Yang 等^[12]通过 SCB 试验构造沥青混凝土抗裂性能的 R 曲线。Huang 等^[13]在 SCB 试验过程中,采用工业相机捕捉裂纹的扩展长度,确定了沥青混凝土的 J 积分。ASTM 和 AASHTO 还制订了 SCB 试验的标准测试方法^[14,15]。SCB 试验除了针对沥青混凝土张开型(I型)断裂之外, Ayatollahi 等^[16]通过调整 SCB 试验装置支座位置进行不对称三点弯曲试验,实现对有机玻璃试件纯拉伸(I型)到拉剪(I型-II型)到纯剪切(II型)加载的完整组合,测试结果表明该方法适合拉剪复合模式加载。Ameri 等^[17]、Aliha 等^[18]、Mehdinejad 等^[19]采用该

方法,研究了拉剪复合模式加载下沥青混凝土的复合型断裂性能指标。然而,通过 SCB 试验只能获取荷载大小以及荷载线位移(或缺口张开位移)等测试指标,以及通过荷载-线位移曲线计算断裂能、断裂韧度、刚度等表征断裂性能的指标,并不能解释沥青混凝土的开裂机理。为了从机理上更好地分析沥青混凝土的开裂特性,常将 SCB 试验与数值模拟结合起来,在数值模拟中采用开裂模型来描述沥青混凝土的开裂特性,通过对比数值模拟与试验测得的荷载-线位移曲线校验沥青混凝土的开裂模型及参数,从而将沥青混凝土 SCB 试验测试指标与材料断裂性能联系起来,并可进一步预测沥青混凝土以及沥青路面的抗低温开裂性能。

在材料的开裂模型中,黏聚区模型(Cohesive zone model, CZM)可以显式表征材料从损伤到开裂的全过程,近年来被广泛应用于材料开裂问题研究。Liu 等^[20]、Al-Qudsi 等^[21]采用 CZM 模拟 SCB 试验,通过与试验得到的荷载-位移曲线进行对比验证了 CZM 及其参数。除了模拟 SCB 试验之外, CZM 还常用于分析沥青混凝土其他断裂性能评价试验以及路面开裂问题。张东等^[22]采用双线性 CZM 模拟沥青混凝土劈裂试验。赵永利等^[23]和钮凯健等^[24]将 CZM 引入二维沥青路面模型中研究路面的低温缩裂机理。Song 等^[25]引入 CZM 对沥青混凝土单边缺口梁的开裂过程进行了模拟。Kim 等^[26]通过间接拉伸试验和圆盘紧凑拉伸试验获得沥青混凝土的断裂性能参数,结合有限元方法,采用双线性 CZM 模拟了道面结构的低温开裂。Dave 等^[27]、Ban 等^[28]、Rith 等^[29]应用 CZM 分析了温度变化引起的沥青加铺层反射裂缝。Mu 等^[30]应用 CZM 模拟了水泥路面上加铺沥青层时的界面脱粘现象。Kim 等^[31]还通过编制用户子程序,在 ABAQUS 中实现了速率相关的黏聚区模型。总之, CZM 已被大量研究证实是

模拟沥青混凝土试件及路面开裂问题的有效手段,SCB 试验有必要结合 CZM 模拟,从而对沥青混凝土的开裂特性开展深入分析。

本文基于 ABAQUS 有限元软件,引入双线性 CZM 开展 SCB 试验模拟研究,分析 SCB 模型从加载至断裂全过程的内部应力分布、系统能量平衡和断裂性能参数,并分析 SCB 试验模拟得到的荷载-线位移与 CZM 参数之间的关系。

1 SCB 数值模型

1.1 SCB 试件形式

SCB 试验试件的半径为 75 mm,厚度为 30 mm,支座间距为 120 mm,跨中切口长 15 mm,宽 1.5 mm。在试件顶端施加位移荷载,切口正上方潜在开裂区域布设 CZM 单元,模拟 SCB 试件的 I 型开裂。SCB 试件的几何尺寸及加载方式如图 1 所示。

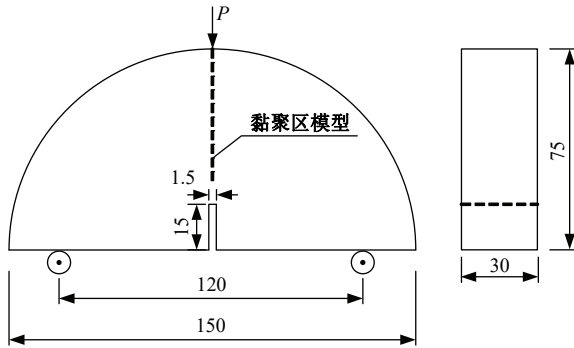


图 1 SCB 试件尺寸 (mm)

Fig. 1 SCB test specimen configuration (millimeters)

1.2 CZM 本构关系

CZM 模拟材料的断裂行为采用 ABAQUS 软件中基于牵引力-分离法则 (Traction-separation law) 的黏结单元 COH3D8 来具体实现。牵引力-分离法则实际上描述的是黏结单元两个相对面之间的拉伸应力与法向 (方向 n) 相对位移的关系,以及相对面切向应力与水平向 (方向 s, t) 相对位移的关系。根据相对位移方向,可以模拟断裂力学中的张开、滑开、撕开以及复合开裂^[32]。双线性 CZM 牵引力-分离法则将单元开始受力直至完全失效所受的应力与相对位移分为 3 个阶段,如图 2 所示。

第 I 阶段为单元损伤前的线弹性阶段,对于单向受力状态,应力与相对位移成正比。

$$t_i = K_i \delta_i = E_i \frac{\delta_i}{T_0} \quad (1)$$

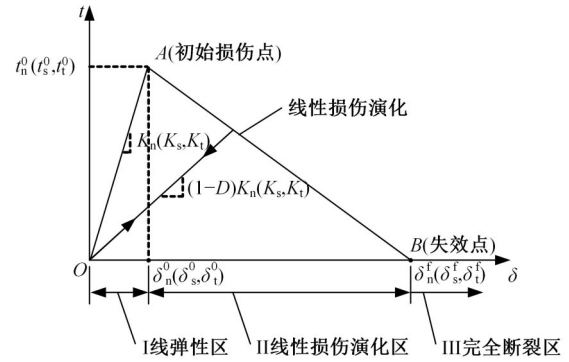


图 2 CZM 应力-位移响应本构

Fig. 2 Stress-separation response constitute of CZM

式中: t_i 、 K_i 、 E_i 和 δ_i 分别为单元 i 方向 (i 表示 n、s、t) 的应力、刚度、弹性模量和相对位移; T_0 为单元厚度。

A 点为单元初始损伤点,在单向受力时对应于材料在该方向能够承受的最大应力 t_i^0 。在 A 点,单元所模拟的材料并没有形成宏观裂缝,而是出现初始损伤或假想裂纹,应力也不会立即降为 0。

第 II 阶段为损伤演化阶段, A 点初始损伤之后应力随相对位移不断减小,单元软化,线性软化采用一条直线表示损伤演化阶段应力与张开位移的线性关系。

$$t_i = (1 - D) K_i \delta_i \quad (2)$$

式中: D 为损伤变量,用来表示单元发生损伤后刚度的折减程度, D 从 0 到 1 单调增加,相应的单元刚度逐渐减小, D 增至 1 时表示单元完全失效。对于单向受力线性损伤演化情况, D 的表达式为:

$$D = \frac{\delta_i^f (\delta_i - \delta_i^0)}{\delta_i (\delta_i^f - \delta_i^0)} \quad (3)$$

式中: δ_i^0 为纯 i 方向受力单元发生初始损伤时的相对位移; δ_i^f 为纯 i 方向受力单元完全失效时的相对位移。

若在损伤演化阶段卸载,则应力-位移曲线沿割线回到原点,再加载时又沿此割线发展直至与原曲线相交。

第 III 阶段为失效阶段,当断裂能 G_i 达到单元材料属性时,应力变为 0,单元完全失效,假想裂纹发展成实际宏观裂缝。对于单向受力线性损伤演化情况, G_i 的表达式为:

$$G_i = \frac{1}{2} t_i^0 \delta_i^f \quad (4)$$

对于线性损伤演化的黏结单元,需要 3 个基

本参数描述应力-位移响应本构,即黏结单元线弹性阶段的弹性模量 E 、初始损伤应力 t_0 和断裂能 G_f 。

1.3 SCB 模型验证

对于图 1 中的沥青混凝土 SCB 试件,在跨中位移荷载作用下黏结单元会发展成沿水平的张开裂缝。通过数值计算得到的荷载-线位移曲线与文献[33]的试验结果进行对比,来验证所建 SCB 有限元模型的可靠性。可靠性验证中 SCB 有限元模型在支座处仅约束竖向位移,模型材料力学参数与试验模型一致,弹性模量 E_0 为 16 000 MPa;泊松比 ν 为 0.35,最大应力 t_0 为 3.0 MPa,断裂能 G_f 为 480 N/m。其中,黏结单元之外的 SCB 试件实体假设为线弹性,采用三维实体单元 C3D8 模拟。因为黏结单元是用于模拟实体局部受力最大处的潜在开裂位置,所以,黏结单元线弹性阶段的弹性模量和最大应力与实体单元一致,而后损伤断裂阶段通过断裂能控制。

SCB 模型试验与数值模拟得到的荷载-线位移曲线对比如图 3 所示,由图可知,采用双线形黏聚区模型得到的荷载-线位移曲线与试验结果吻合良好,曲线变化趋势一致,峰值荷载仅相差 0.84%,表明双线形黏聚区模型适用于模拟沥青混凝土 SCB 试验的开裂过程。

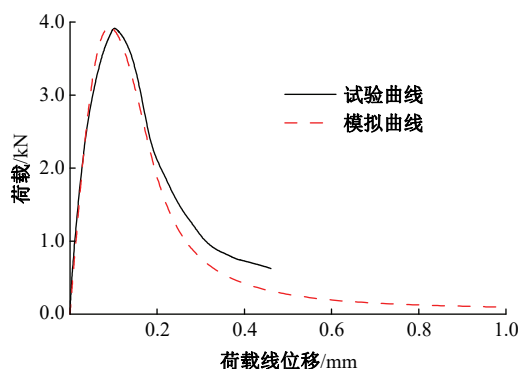


图 3 荷载-线位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of load-displacement curves

2 SCB 试件断裂分析

根据 SCB 试件缺口上方黏结单元力学响应随位移荷载的变化,分析 SCB 试件跨中截面的应力分布状态、系统能量平衡和断裂性能参数。

2.1 SCB 试件跨中截面应力分布

随着施加位移荷载的增大,跨中截面的应力分布变化可分为弹性、损伤和开裂 3 个阶段,如图

4 所示。当加载位移较小时,SCB 试件缺口上方黏结单元所受拉应力小于初始损伤时的最大应力,SCB 试件跨中截面的沥青混凝土为线弹性响应,拉应力随着施加位移的增加而增大,当荷载线位移约为 0.006 mm 时,缺口上方黏结单元受到的拉应力达到初始损伤应力,如图 4(a) 所示。随

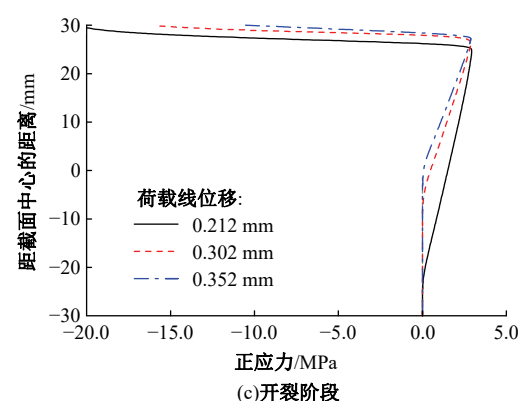
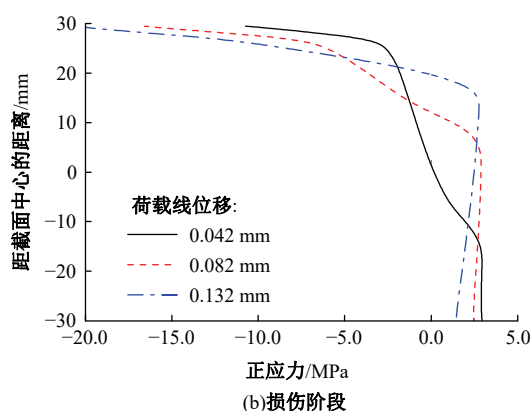
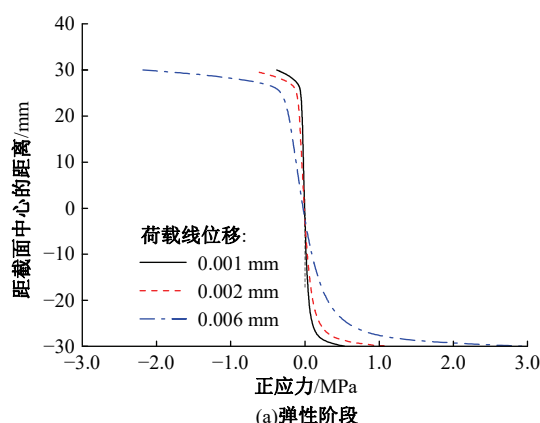


图 4 不同加载阶段 SCB 试件跨中截面应力分布

Fig. 4 Stress distribution of cross section at mid-span of SCB specimen under different loading stages

着加载位移的继续增加,缺口上方黏结单元进入损伤演化阶段,承受的拉应力逐渐减小,截面最大拉应力位置从靠近缺口位置逐渐背离缺口向上移动,即黏结单元从下往上逐渐进入损伤演

化阶段,SCB 试件跨中截面的应力会发生重分布,如图 4(b)所示。随着加载位移的进一步增大,缺口上方黏结单元会不断进入失效阶段而失去承载力,形成宏观裂缝并不断向上扩展,SCB 试件迅速断裂,如图 4(c)所示。

随着施加位移的增大,跨中截面黏结单元状态如图 5 所示,可以看出,黏结单元从下往上先后从弹性进入损伤再进入失效状态,直至整个 SCB 试件断裂。

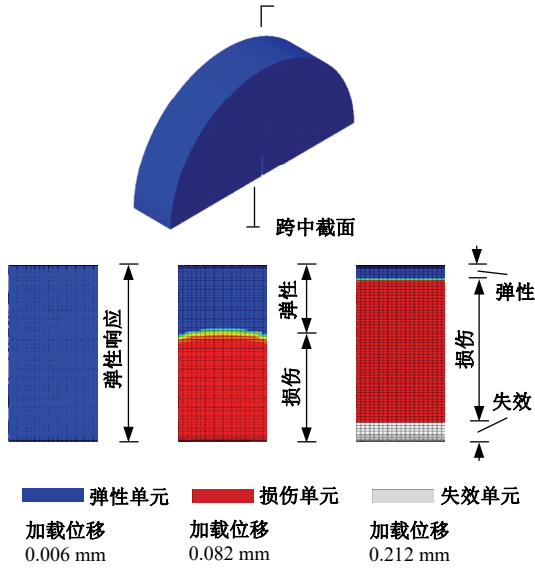


图 5 不同加载阶段 SCB 试件跨中截面黏结单元状态

Fig. 5 Status of cohesive elements at mid-span of SCB specimen under different loading stages

2.2 SCB 试件受力分析

SCB 试件荷载-线位移曲线如图 6 所示。当施加的位移荷载约为 0.006 mm 时,底部黏结单元受到的拉应力达到初始损伤应力,此时 SCB 承受的荷载是试件处于弹性受力阶段的临界值。随着位移荷载的增加,跨中截面从下往上不断有黏结单元受到损伤,但承受的荷载随着受拉区面积的增大而持续增大;当位移荷载约为 0.084 mm 时,SCB 试件承受的荷载达到峰值,对应峰值荷载约为弹性阶段临界荷载的 8.65 倍;随着位移荷载的进一步增加,由于受拉区损伤的黏结单元数量增多,SCB 试件承受的荷载开始下降;当位移荷载增加到 0.192 mm 时,底部黏结单元首先达到断裂能而失去承载能力,此时 SCB 试件承受的荷载仅为峰值荷载的 0.45。

2.3 SCB 断裂性能指标分析

2.3.1 断裂韧度

采用 SCB 试验确定断裂韧度的计算式为^[15]:

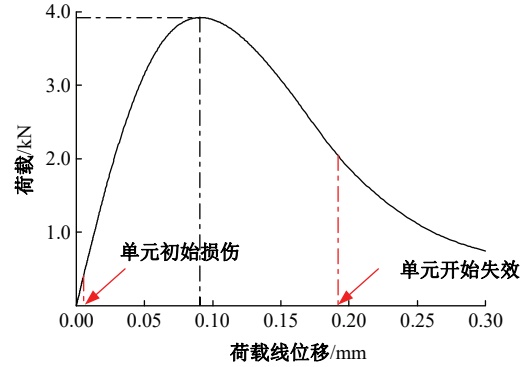


图 6 SCB 试件荷载-线位移曲线及黏结单元状态

Fig. 6 Load-load line displacement curve and status of cohesive elements of SCB specimen

$$K_{IC} = Y_{I(0.8)} \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

$$\sigma_0 = P_c / 2rb \quad (6)$$

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 - 1.219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0.063 e^{7.045 \frac{a}{r}} \quad (7)$$

式中: K_{IC} 为断裂韧度; P_c 为裂纹开始失稳扩展的临界荷载; σ_0 为临界荷载对应的应力; a 为裂纹长度; r 为 SCB 试件半径; b 为 SCB 试件厚度; $Y_{I(0.8)}$ 为与试件裂缝长度和几何形状相关的系数。

在以往文献和国外标准中,计算断裂韧度 K_{IC} 的临界荷载 P_c 基本上是采用荷载-线位移曲线上的峰值荷载,而从 SCB 试件受力分析可知,跨中底部黏结单元真正出现断裂失效是在峰值荷载之后,且此时承受的荷载仅为峰值荷载的 0.45。因此,无论是从本文采用 CZM 模拟 SCB 的开裂过程,还是从实际荷载-线位移曲线的非线性可知,裂纹失稳扩展点并非对应荷载-线位移曲线上的峰值荷载,采用峰值荷载计算断裂韧度将会偏大。

2.3.2 断裂能

断裂能是单位面积裂缝扩展单位长度消耗的能量。断裂能越大,表示沥青混凝土的低温抗裂性能越强。断裂能计算式为^[15]:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (8)$$

$$W_f = \int_0^{u_f} p(u) du \quad (9)$$

式中: G_f 为断裂能; W_f 为断裂功,即荷载-线位移曲线所围面积; A_{lig} 为断裂韧带面积, $A_{lig} = (r - a) \times b$; $p(u)$ 为荷载; u 为荷载线位移; u_f 为试件上荷载降至 0.1 kN 对应的线位移。

SCB 试件裂纹扩展过程中的能量变化如图 7 所示。从能量平衡的角度分析,在不考虑沥青混

凝土的黏塑性时,断裂功将全部转换成 SCB 试件的弹性应变能和跨中截面黏结单元损伤断裂的耗散能。当施加位移荷载较小时,黏结单元没有出现损伤断裂,断裂功全部转换成 SCB 试件内的弹性应变能。随着施加位移荷载的增加,黏结单元受到损伤,断裂功转换成 SCB 试件内的弹性应变能和黏结单元损伤耗散能;随着施加位移荷载的进一步增加,当加载位移约为 0.192 mm 时底部黏结单元出现断裂,SCB 试件储存的弹性变形能迅速下降,释放出的弹性应变能提供了黏结单元失效的断裂能,或者理解为形成新裂纹表面的表面能;随着 SCB 试件跨中截面损伤断裂的黏结单元数量增多,试件因裂缝扩展而大部分成为非连续体,能存储的弹性应变能迅速减少,大部分断裂功都转换成形成新裂纹的黏结单元损伤断裂耗散能;当加载位移超过 0.4 mm 后,因跨中黏结单元断裂扩展成长裂缝,SCB 试件无法继续承载,断裂功、耗散能和弹性应变能都不再继续增长。

采用式(8)计算断裂能时,假设断裂功全部转换为断裂能,而根据上面的分析可知,断裂功除了大部分转换为断裂能之外,仍有少部分转换为试件未开裂区域的弹性应变能,采用式(8)计算断裂能也将会偏大。若考虑中温时沥青混凝土的黏塑性在开裂过程中产生的耗散能,采用式(8)计算断裂能更将会偏大。

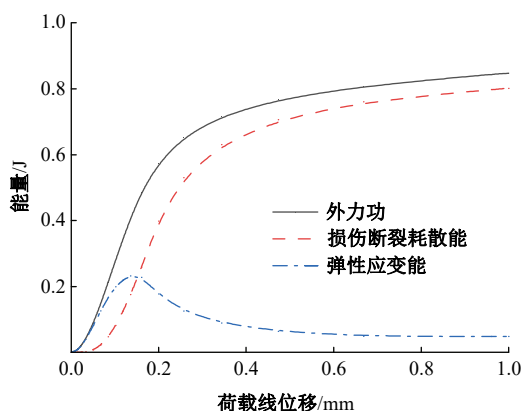


图7 SCB试验中的能量平衡

Fig. 7 Energy balance during SCB test

3 SCB 荷载-线位移影响分析

SCB 试件断裂过程中的荷载-线位移曲线形态与跨中开裂路径上的黏结单元本构模型密切相关。描述双线性黏聚区模型的黏结单元参数有弹性模量、初始损伤应力和断裂能,下面分析黏结单元的初始损伤应力和断裂能对 SCB 荷载-线位移

的影响。

3.1 黏结单元断裂能参数的影响

假设黏结单元初始损伤应力为 3.0 MPa 不变,断裂能分别取 180、330、480、630、780 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$,根据图 2 所示 CZM 应力-位移响应本构关系,初始损伤应力不变而断裂能增大,相当于弹性阶段不变而损伤演化阶段变大。计算得到的荷载-线位移曲线如图 8 所示,由图可知,当黏结单元断裂能从 180 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 增大至 780 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$,峰值荷载仅从 3.37 kN 增大至 4.20 kN,相对于黏结单元断裂能的增幅,峰值荷载增幅并不明显,这可以结合前面的开裂机理分析进行解释。峰值荷载对应 SCB 试件缺口上方部分黏结单元发生损伤阶段,从能量平衡角度分析,此时大部分断裂功转换为黏结单元的弹性应变能和损伤耗散能,此时黏结单元的弹性应变能和损伤耗散能相当于黏结单元应力-位移曲线(见图 2)在 SCB 试件峰值荷载对应损伤点之前所围面积,该面积主要取决于黏结单元的初始损伤应力,而断裂能主要影响峰值荷载之后的响应。

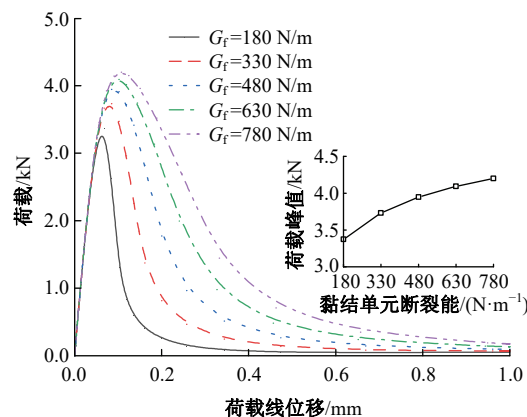


图8 荷载-线位移曲线随黏结单元断裂能的变化

Fig. 8 Load-load line displacement curves varied with fracture energy of cohesive elements

3.2 黏结单元初始损伤应力的影响

假设黏结单元断裂能 480 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 不变,初始损伤应力分别取 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 MPa。根据图 2 所示 CZM 应力-位移响应本构关系,初始损伤应力变大而断裂能不变,相当于弹性阶段变大而损伤演化阶段变小。计算得到的荷载-线位移曲线如图 9 所示,由图可知,当初始损伤应力从 2.0 MPa 增大至 4.0 MPa,峰值荷载从 2.90 kN 增大至 4.84 kN 时,增幅明显,这与前面的分析一致,即达到峰值荷载时,黏结单元的弹性应变能和

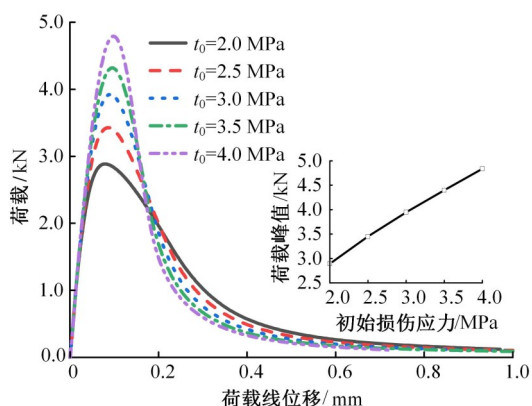


图9 荷载-线位移曲线随黏结单元初始损伤应力的变化
Fig.9 Load-load line displacement curves varied with damage initiation stresses of cohesive elements

损伤耗散能主要取决于黏结单元的初始损伤应力。因此,相对于增大沥青混凝土的断裂能,提高抗拉强度将更有利于增强其抗裂性能。

4 结 论

(1)基于有限元软件ABAQUS,采用双线性黏聚区模型对沥青混凝土SCB试件从加载至断裂全过程进行了模拟,通过与试验荷载-线位移结果进行对比,表明双线性黏聚区模型在沥青混凝土损伤开裂分析中具有良好适用性。

(2)通过SCB试件内部黏结单元在加载过程中的应力分布变化分析,表明SCB试件经历了弹性、损伤和断裂阶段,揭示了SCB试件的断裂机理。通过SCB试件所受荷载随内部黏结单元应力状态的变化分析,表明裂纹失稳扩展点并非对应峰值荷载,采用峰值荷载计算断裂韧度结果将会偏大。从能量平衡角度分析了SCB试件裂纹扩展过程中的能量变化,表明加载过程中少部分断裂功会转换为试件未开裂区域的弹性应变能,SCB试验采用断裂功计算断裂能结果也将会偏大。

(3)分析了SCB试件荷载-线位移曲线随内部黏结单元断裂能与初始损失应力参数的变化,表明SCB试件开裂过程中所能承受的峰值荷载主要取决于抗拉强度而非断裂能。

(4)本文采用黏聚区模型模拟SCB试验是假定裂纹始终沿着布设黏结单元的跨中截面扩展,而实际SCB试件开裂位置受内部集料、沥青胶浆以及集料-沥青胶浆界面的分布和性质等细观组成影响,更精确的开裂模拟需要进一步开展细观

断裂分析。另外,从能量平衡的角度分析SCB试件断裂时,还应考虑沥青混凝土黏塑性在加载过程中产生的耗散能,特别是在中温条件下沥青混凝土的黏塑性不可忽略时。

参考文献:

- [1] Wagoner M P, Buttlar W G, Paulino G H, et al. Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test[J]. Transportation Research Record, 2005, 1929: 183-192.
- [2] Wagoner M P, Buttlar W G, Paulino G H. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(3): 270-277.
- [3] Radeef H R, Hassan N A, Abidin A R Z, et al. Determining fracture energy in asphalt mixture: a review [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Putrajaya, Malaysia, 2021: 1-11.
- [4] Meng Y, Kong W, Gou C, et al. A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test[J]. Journal of Road Engineering, 2023, 3(1): 87-97.
- [5] 李萍, 吴中, 马科, 等. 基于SCB试验的沥青混合料低温抗裂性研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2015, 39(2): 238-241.
Li Ping, Wu Zhong, Ma Ke, et al. Cracking resistant of asphalt mixture at the low temperature based on the SCB test[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(2): 238-241.
- [6] 罗培峰. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料断裂试验方法和评价指标研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2017.
Luo Pei-feng. Research on the asphalt mixture crack test methods and evaluation indexes based on SCB [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2017.
- [7] 陈巧巧, 凌天清, 何立. 基于SCB试验的沥青混合料抗裂性能影响因素研究[J]. 公路交通技术, 2018, 34(4): 37-41.
Chen Qiao-qiao, Ling Tian-qing, He Li. Study on factors affecting crack resistance of asphalt mixture based on SCB test[J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(4): 37-41.
- [8] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于SCB试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学

- 报, 2020, 33(7): 50-57.
- Feng De-cheng, Cui Shi-tong, Yi Jun-yan, et al. Evaluation index of low-temperature asphalt mixture performance based on semi-circular bending test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 50-57.
- [9] 姜鑫龙, 杨树, 李庭予. 基于半圆弯曲试验的沥青混凝土低温性能指标研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 428-434.
- Jiang Xin-long, Yang Shu, Li Ting-yu. Research on low-temperature performance index of asphalt concrete based on semi-circular bending test[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 428-434.
- [10] Vega A M M, Yang S, Braham A, et al. Evaluation of semi-circular bend geometric properties for asphalt concrete testing[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(12): No. 04021342.
- [11] Mobasher B, Mamlouk M S, Lin H M. Evaluation of crack propagation properties of asphalt mixtures[J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 123(5): 405-413.
- [12] Yang S, Braham A F. Influence of binder grade, gradation, temperature and loading rate on R-curve of asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154:780-790.
- [13] Huang R, Yang S, Liu T, et al. Determination of J-integral of asphalt concrete based on SC(B) test configuration and image analysis[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248:No. 118727.
- [14] ASTM D8044-23. Standard test method for evaluation of asphalt mixture cracking resistance using the semi-circular bend test (SCB) at intermediate temperatures[S].
- [15] AASHTO TP 124-20. Determining the fracture potential of asphalt mixtures using the Illinois flexibility index test (I-FIT)[S].
- [16] Ayatollahi M R, Aliha M R M, Saghaei H. An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(1): 110-123.
- [17] Ameri M, Mansourian A, Pirmohammad S, et al. Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 93: 153-167.
- [18] Aliha M R M, Behbahani H, Fazaali H, et al. Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 623-635.
- [19] Mehdinedjad S, Fazaali H, Moniri A, et al. Comparison of two criteria of stress intensity factor and fracture energy to investigate the behavior of asphalt mixtures under combined tensile-shear loading modes-A statistical approach[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290:No. 123230.
- [20] Liu P, Chen J, Lu G, et al. Numerical simulation of crack propagation in flexible asphalt pavements based on cohesive zone model developed from asphalt mixtures[J]. Materials, 2019, 12:No. 1278.
- [21] Al-Qudsi A, Falchetto A C, Wang D, et al. Finite element cohesive fracture modeling of asphalt mixture based on the semi-circular bending (SCB) test and self-affine fractal cracks at low temperatures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: No. 102916.
- [22] 张东, 黄晓明, 赵永利. 基于内聚力模型的沥青混凝土劈裂试验模拟[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010, 40(6): 1276-1281.
- Zhang Dong, Huang Xiao-ming, Zhao Yong-li. Simulation of indirect tension test of asphalt mixtures based on cohesive zone model[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(6): 1276-1281.
- [23] 赵永利, 张东. 基于内聚力模型的沥青路面低温缩裂研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(1): 11-16.
- Zhao Yong-li, Zhang Dong. Study of low temperature cracking of asphalt pavement based on cohesive zone model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(1): 11-16.
- [24] 钮凯健, 李昶. 基于内聚力模型的沥青路面低温缩裂数值模拟[J]. 公路交通科技, 2012, 29(6): 11-15, 21.
- Niu Kai-jian, Li Chang. Numerical simulation of low-temperature shrinkage cracking of asphalt pavement based on cohesive zone model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(6): 11-15, 21.
- [25] Song S H, Paulino G H, Buttlar W G. A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(18): 2829-2848.
- [26] Kim H, Buttlar W G. Finite element cohesive fracture modeling of airport pavements at low temperatures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 57(2):123-130.

- [27] Dave E V, Buttlar W G. Thermal reflective cracking of asphalt concrete overlays[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11(6):477-488.
- [28] Ban H, Im S, Kim Y R, et al. Laboratory tests and finite element simulations to model thermally induced reflective cracking of composite pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 19(3): 220-230.
- [29] Rith M, Kim Y K, Lee S W. Reflective cracking from thermal loading in asphalt-concrete composite pavements[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2022, 175(3):178-186.
- [30] Mu F, Vandenbossche J. A superimposed cohesive zone model for investigating the fracture properties of concrete-asphalt interface debonding[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40: 496-511.
- [31] Kim Y R, Aragão F T S. Microstructure modeling of rate-dependent fracture behavior in bituminous paving mixtures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 63: 23-32.
- [32] 周正峰, 蒲卓桁, 刘超. 黏聚区模型在沥青路面反射裂缝模拟中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(3): 5-14.
Zhou Zheng-feng, Pu Zhuo-heng, Liu Chao. Application of cohesive zone model to simulation reflective crack of asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(3): 5-14.
- [33] Falchetto A C, Moon K H, Lee C B, et al. Correlation of low temperature fracture and strength properties between SCB and IDT tests using a simple 2D FEM approach[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(Sup2): 329-338.