

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.07.006

基于内聚力模型的预裂缝技术机理分析

刘敬辉

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 基于水泥稳定基层产生收缩裂缝难以避免, 并容易扩展到沥青面层而形成反射裂缝, 故在水泥稳定基层材料摊铺后养护的1~3 d内, 采用振动压路机进行碾压, 使其产生网状细裂缝, 避免产生宽或长的裂缝, 形成了理想的裂缝分布模式。采用内聚力模型对裂缝分布模式进行模拟, 并对预裂缝技术的机理进行了理论分析。结果表明: 与间距大、数量少而宽的裂缝相比, 间距小、数量多的细裂缝引起反射裂缝的可能性要小很多, 预裂缝技术释放了早期水泥稳定基层内部由于干缩和温缩蓄积的部分能量。根据能量最小原理, 系统的能量越小, 系统越稳定。基于能量法的内聚力模型能较好的模拟裂缝, 解释了预裂缝技术的本质机理, 为预裂缝技术的应用提供了良好的理论基础。
关键词: 道路工程; 预裂缝; 内聚力模型; 能量最小原理; 收缩裂缝

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)07-0032-06

Mechanism Analysis of Pre-cracking Technique Based on Cohesive Zone Model

LIU Jinghui

(School of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: Shrinkage cracks are intend to occur in cement stabilized base, and are easy to propagate towards the asphalt surface to form reflective crack. In order to reduce reflective cracking, vibratory roller was used to pass to the cement-treated base in a stage of 1 to 3 days after placement to create a fine network of cracks to avoid the wide or long cracks and create the ideal crack evolution model. The cohesive zone model was introduced to numerically simulate the crack evolution model and interpret the mechanism of pre-cracking. The result shows that (1) In contrast with a few wide cracks of broad spacing, numerous thin cracks of narrow spacing contribute little to the severe reflection cracking. In terms of energy, the pre-cracking technique released accumulated energy of drying shrinkage and temperature shrinkage in early cement stabilized base. (2) By minimum energy principle, the smaller energy, the more stable. The cohesive zone model based on energy method could better simulate cracking, explain the nature and mechanism of pre-cracking technique, and provide a sound theoretical basis for pre-cracking application.

Key words: road engineering; pre-cracking; cohesive zone model; minimum energy principle; shrinkage crack

0 前言

目前, 我国高等级公路普遍采用半刚性基层沥青路面, 水泥稳定类基层最主要的缺陷就是在施工养护期间, 容易产生较大的干缩、温缩裂缝, 从而导致面层产生反射裂缝, 由于半刚性基层产生收缩

裂缝基本是难以避免的, 国内外不少的专家学者^[1]从施工工艺的角度对如何减少或者减轻收缩裂缝的严重程度进行了许多的研究, 在德国、奥地利采用释放应力来产生微裂缝, 在基层刚完成后可以允许施工车辆在上面通过, 或者在铺完24 h后, 在上面通过振动压路机破碎基层, 这适合厚度不大厚,

收稿日期: 2011-07-01

作者简介: 刘敬辉(1978-), 男, 湖北宜昌人, 博士后, 副教授. (yangjianxue33@126.com)

强度不高的半刚性基层;在法国也在研究对施工7 d后的半刚性基层进行人为加载。即将980 kg重的悬球式击毁机从距地面高10、20、30 cm处砸向地面半径为30 cm的金属盘上,间距为4 m一个点,据说这种做法可以使3 a后路面裂缝较少。捷克斯洛伐克在水泥稳定材料硬结过程中,用反复碾压的方法人为地创造微细裂缝网;科威特在新铺的水泥土基层上用重型钢轮压路机碾压,故意使水泥土基层预先可开裂;近年来,美国Scullion和Sebesta^[2-3]对采用预裂缝技术(Pre-cracking或Microcracking)减少半刚性基层反射裂缝进行了研究,其方法就是在半刚性基层材料(通常为水泥稳定类材料)摊铺后1~3 d养生期间,采用钢轮压路机等振动压实设备对半刚性基层进行碾压,形成细如头发丝的网状裂缝(多数肉眼不可见),实践证明,这种方法能极大的减少裂缝的数量,降低裂缝的严重程度,能避免基层宽或长裂缝的产生。在国内鲜见预裂缝技术的研究和实践工作,本文从能量的角度^[4],采用内聚力模型对预裂缝技术的机理进行解释,并得出半刚性基层理想的裂缝分布模式。

1 预裂缝技术原理

半刚性基层预裂缝技术起源于澳大利亚,后被德国、法国,英美等国引进并加以改善,其工程措施比较简单,就是在半刚性基层材料(通常为水泥稳定类材料)摊铺后1~3 d养生期间,采用钢轮压路机等振动压实设备对半刚性基层进行碾压,形成细如头发丝的网状裂缝(多数肉眼不可见)。在基层材料铺筑后养护1~3 d内,强度增长最快,水化左右强烈,由于水分的挥发和水化作用以及环境温度的影响,基层材料不可避免的产生收缩,内部形成许多预存裂缝,它们大多是集料与水泥浆体界面的粘结裂缝。在振动压路机的压实作用下,在粗集料与水泥浆体界面上引发出了新的粘结裂缝,采用放大镜观察还可观察到粘结裂缝已扩展到基材中,同时基材中也出现少量砂浆裂缝,粘结裂缝继续扩展,并大量向基材中延伸。砂浆裂缝不断增多,并开始将邻近的粘结裂缝连结起来成为连续裂缝,随着振动荷载的继续作用,粘结裂缝及砂浆裂缝迅速增加,形成贯通裂缝,从而可以部分释放由于收缩变形引起的收缩应力,这样宽而长的裂缝就被网状的细裂缝(肉眼难见)所代替。由于碾压发生在强度形成的早期,由于水泥稳定材料的自愈能力,随着进一步养生,强度会逐渐恢复,不会造成结构的破坏。

半刚性基层预裂缝技术的主要目的是避免水泥稳定材料由于收缩(干缩和温缩)产生严重的宽或长裂缝,其方法主要是基于4点考虑:(1)强度高的水泥稳定类基层在自身干缩、温缩的作用下,会产生较宽的横向裂缝,而这些宽缝很有可能反射到路面。(2)微细裂缝的传荷能力好,也不会反射到路面,而且人工创造的网状细裂缝会大大减轻甚至完全消除宽缝的出现。(3)早期养护期间,预裂缝对基层材料只会造成暂时的强度损失,在随后的养护期间,由于水泥稳定材料本身的自愈能力,其强度会逐渐恢复,完全能满足路面结构对强度的要求。(4)预裂缝技术对基层材料的整体性结构没有影响,采用合适的材料组成设计和施工工艺,在外观上与通常的基层结构也没有明显的区别。

2 内聚力模型

内聚力模型CZM(Cohesive Zone Model)作为一种虚拟裂缝模型,通过室内试验确定力学指标就能对实际的道路结构在环境和荷载的影响下裂缝的扩展进行模拟,借助ABAQUS有限元软件,下面采用内聚力CZM单元对裂缝开裂进行模拟,研究半刚性基层收缩裂缝的开裂模式。

研究裂纹的扩展通常有2种不同的观点。一种观点是应力强度观点,认为裂纹尖端应力强度因子超过材料固有的临界强度因子 K_c 时,裂纹就失稳扩展;另一种是能量观点,认为如果当裂纹扩展一个增量,使得释放的弹性能多于产生新裂纹表面所需要的能量,则发生裂纹的失稳扩展。这2种观点有着密切的联系但并不是完全等效的。CZM并不限于线弹性断裂,但可归属于能量观点。

内聚力模型CZM是一种唯象模型,其核心思想就是采用内聚力与相对位移之间的关系来描述材料的非线性本构模型^[5-6],图1(a)描述了宏观尺度上材料裂纹尖端区域的示意图;图1(b)描述了微观尺度上内聚带尖端与宏观尺度上材料裂纹尖端与微观尺度上计算尖端之间的关系,三者是完全不同的概念,又是相互联系的,宏观材料裂纹尖端位置(E点)内聚力为零,内聚力尖端位置(C点)内聚力达到最大峰值强度,计算尖端位置(A点)是起裂点,内聚力为零,内聚带定义为宏观材料尖端位置(E点)与计算尖端(A点)之间的区域;图2描述了一典型与之相应的内聚力(σ)-相对位移(δ)关系曲线。典型内聚力作用区域可以分为前部和后部,相应位置如图1所示,随着外部荷载的增

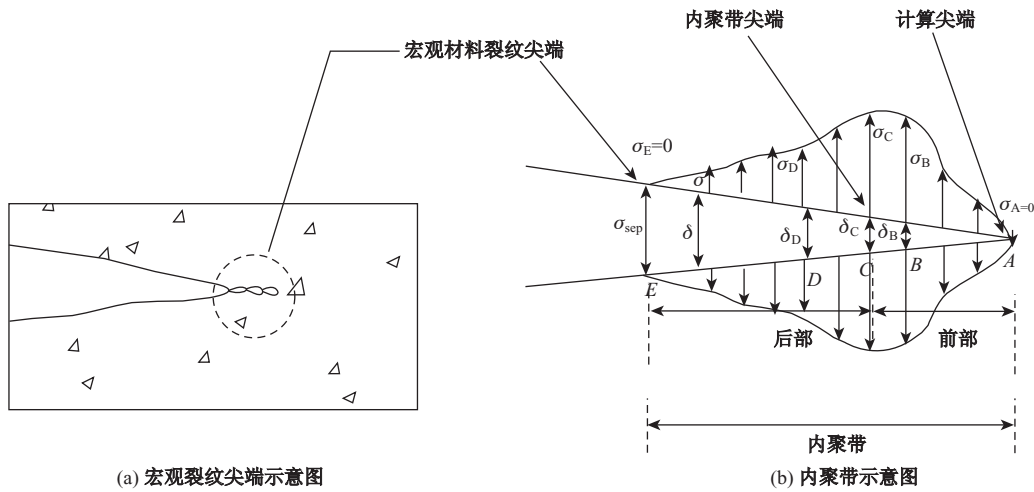


图1 宏观裂尖与微观内聚带关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relation between macro crack tip and micro cohesive zone

加, 内聚力 σ 不断增长, 相对位移 δ 相应增长, 内聚力达到峰值 σ_c , 然后逐渐降到零, 相对位移达到最大 δ_{sep} 。

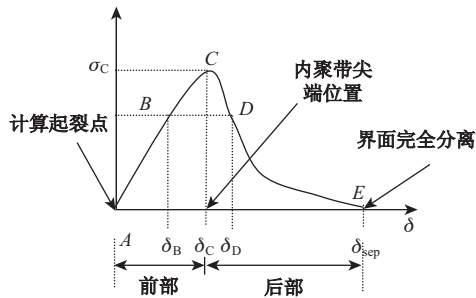


图2 典型内聚力-相对位移关系曲线

Fig. 2 Typical cohesion vs. relative displacement

内聚力-相对位移曲线下面积值的大小即为断裂能 G_F (图2), 通过积分, 可以得到内聚力区域断裂能的计算公式:

$$G_F = \int_0^{\delta_{sep}} \sigma(\delta) d\delta. \quad (1)$$

$\sigma(\delta)$ 曲线 (即内聚力-张开量关系, 也称为解粘关系或者说是界面的本构关系), 表述了材料的内聚关系。由于内聚模型是一种唯象模型, 很难找到证明该采用怎么样的 $\sigma(\delta)$ 曲线, 所以 $\sigma(\delta)$ 只是一种近似量化关系。不同的作者所采用的曲线形状各不相同, 不过有2点是一致的: (1) 描述本构关系的材料参数有临界相对位移 δ_{sep} 、临界内聚力 σ_c 、断裂能 G_F , 其中只有2个参数是相互独立的, 所以计算的时候只需要输入其中2个参数就行。(2) 完全分离后, 内聚力为零, $\sigma(\delta \geq \delta_{sep}) = 0$ 。

3 输入参数确定

由上面可知, 确定 CZM 单元的关键材料参数有2个, 临界内聚力 σ_c 和断裂能 G_F , 采用常规的 IDT 间接拉伸试验 (或劈裂试验) 就可以确定。劈裂试验在 MTS810 系统上进行, 可以记录下较为完整的荷载-位移曲线。劈裂强度就对应着临界内聚力 σ_c , 外力所作的功 W 由试验加载曲线 P (荷载)- u (位移) 下的面积求得, 如图3所示, 断裂能 G_F 则由式 (2) 计算。

$$G_F = \frac{W}{A} = \frac{W}{DH}, \quad (2)$$

式中: A 为断裂面积; D 为试件直径; H 为试件高度。

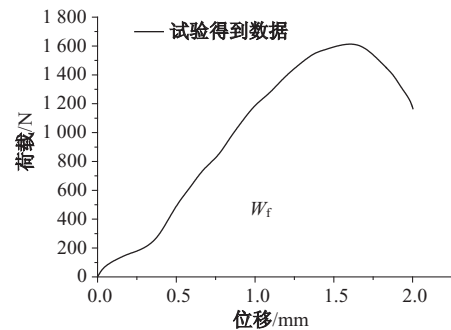


图3 荷载-位移曲线图

Fig. 3 Load-displacement curve

$$W = \int P du. \quad (3)$$

临界内聚力 σ_c 则可由规范《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ057—94) 确定:

当试件尺寸为 D (100 mm) $\times H$ (100 mm) 时:

$$\sigma_c = 0.006\ 263 \frac{P_{\max}}{H}, \quad (4)$$

当试件尺寸为 D (150 mm) $\times H$ (150 mm) 时:

$$\sigma_c = 0.004\ 178 \frac{P_{\max}}{H}, \quad (5)$$

式中, $P_{\max}$ 为试件破坏时的最大压力; H 为试件的高度。

值得注意的是, 对于水泥稳定碎石这种半脆性材料, 在达到最大荷载 $P_{\max}$ 破坏后, 应该还具有一定的承载能力, 而不是马上破坏, 但是在实际的试验中, 由于试验仪器本身测量精度的限制, 试验达到最大荷载后, 可以测得的荷载 (P) - 位移 (u) 数据非常有限, 使得这样计算的功 $W = W_f$ 往往偏小, 如图 4 所示, 理论上采用 $W = W_f + W_{\text{tail}}$ 比较合理的。

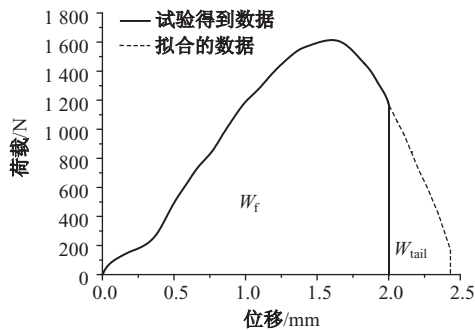


图4 功计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of work calculation

根据文献6的建议, 发现荷载-位移曲线的尾部曲线往往具有如下-2次幂函数的特征:

$$P = \frac{T}{u^2}, \quad (6)$$

式中, P 为加载曲线尾部的荷载; u 为位移; T 为常数 (随不同的曲线变化, 拟合得到)。则可以得到:

$$W_{\text{tail}} = \int_{u_c}^{\infty} P(u) du = \frac{T}{u_c}, \quad (7)$$

式中 u_c 为实际试验得到的最大位移。此时, 实际试验停止了, 所以关键的是要确定系数 T , T 确定后, 外力施加的功就确定了。

至于系数 T 的确定, 可以采用回归分析拟合得到, 通常采用 70% ~ 80% 的峰值荷载的荷载-位移数据对式 (6) 进行拟合, 得到 T 然后代入式 (7), 则最终外力施加的功 $W = W_f + W_{\text{tail}}$ 就可以求得。

对于内聚力与相对位移之间的关系 (Traction - Separation), 采用如图 5 所示简单的线性软化模型^[7], 本文只考虑收缩开裂, 所以剪切方向的强度

并不考虑, 只考虑张拉破坏, σ_c = 劈裂强度, 断裂能 G_F = 三角形的面积。

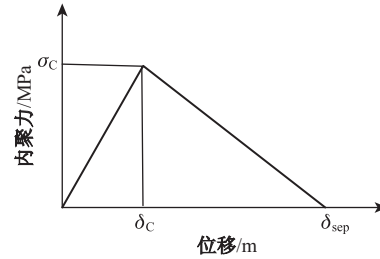


图5 典型 Traction - Separation 响应示意图

Fig. 5 Schematic diagram of typical Traction - Separation response

4 裂缝道路模型

采用 ABAQUS^[7] 大型商业有限元软件进行模拟, 只需要建立如图 6 所示的二维平面应变有限元模型, 计算速度快, 不需要建立三维有限元模型, 基本假设如下: (1) 路面结构分为基层、底基层和土基共 3 层, 各层都由均质、弹性、各向同性材料组成, 材料的弹性模量和泊松比为 E 和 μ ; (2) 各层层间竖向、水平位移均连续; (3) 不计路面结构的自重影响; (4) 不考虑路面结构垂直方向的变形。

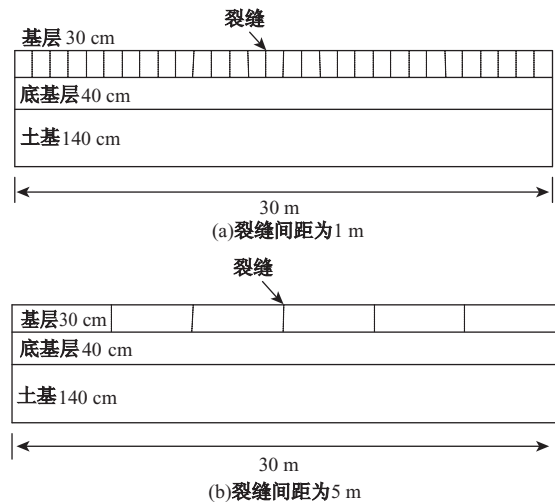


图6 预设裂缝有限元模型

Fig. 6 Finite element model of pre-cracking

因为研究的目的是考虑基层的收缩开裂, 这里假设底基层和土基中的温度和湿度没有变化, 而基层中的温度和湿度沿着基层厚度向下线性递减。在基层中预先设好多条裂缝的位置, 布置 CZM^[8-9] 单元。道路长度假设为 30 m, 为便于考察裂缝的开裂, 采用如图 6 所示的含多条裂缝的道路模型, 考虑 2

种情形,分析不同裂缝间距下裂缝的开裂情况,(1)每隔 1 m 布置 1 条裂缝(采取预裂缝措施后),如图 6 (a);(2)每隔 5 m 布置 1 条裂缝(自然状态未采用预裂缝措施),如图 6 (b)。在基层中可能产生裂纹的位置布置 CZM 单元,在 ABAQUS 有限元软件中采用 sweep 法划分网格,裂缝处布置 COH2D4 单元。

对养生 7 d 的水泥稳定碎石采用上述的 IDT 试验确定 CZM 单元参数, $\sigma_c = 0.12 \text{ MPa}$ 和断裂能 $G_f = 58 \text{ N/m}$,其他的参数见表 1,模拟 7 d 后基层可能开裂的位置及深度。

表 1 计算所用路面结构及材料参数

Tab. 1 Pavement structure and material parameters for calculating

结构层	厚度/ cm	弹性模量/ MPa	干缩系数/ ($\times 10^{-6}\%$)	路表失水 率/%	温缩系数/ ($\times 10^{-6}\%$)	路表降温 幅度/ $^{\circ}\text{C}$	泊松比
基层	30	3 500	100	4	10	20	0.25
底基层	40	3 000					0.30
土基	140	40					0.35

在上述一次降温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和失水 4% 的情况下,间距为 5 m 的裂缝开裂情况如图 7 所示,为便于观察,只截取模型的一段,7 (a) 为裂缝间距为 5 m 边上的裂缝开裂情况,7 (b) 为裂缝间距为 1 m 边上的裂缝开裂情况。

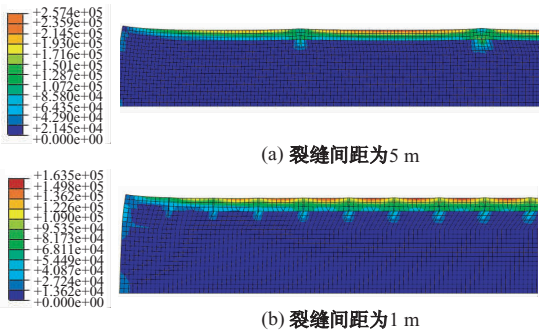


图 7 基层裂缝开裂示意图

Fig. 7 Schematic diagram of crack evolution in base layer

从图 7 可以看出,粘结裂缝开裂,仍然能传递荷载,裂缝上部宽,下部窄;而且整个道路模型中边上位置的最大主应力较小,越靠近中间,应力越大,通过粘结裂缝的开裂,释放了部分应力,2 条裂缝之间中部的应力最大,极易可能进一步开裂,裂缝间距为 1 m 的模型中最大主应力 ($0.163\text{ }5 \text{ MPa}$) 远远小于间距为 5 m 的模型 ($0.257\text{ }4 \text{ MPa}$)。2 种不同裂缝道路模型的能量也相差较远,裂缝间距为 1 m 的模型整个系统的能量为 $145 \text{ N}\cdot\text{m}$,裂缝间距为 5

m 的模型整个系统的能量为 $305 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。这就表明裂缝间距越小,系统蓄积的能量也越小,整个系统越稳定,这就说明了预裂缝技术产生网状细裂缝,能释放收缩应力,降低基层收缩蓄积的总能量,从而使整个基层系统趋于稳定,基层裂缝的最佳分布模式^[10-11]是由多条细裂缝组成,避免宽裂缝的生成。为了定量的得到裂缝间距与系统能量之间的关系,采用与上述类似的模型,分别隔 2、4、10、15 m 布置裂缝,采用 CZM 单元对裂缝进行模拟,同样考虑在一次降温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和失水 4% 的情况下裂缝的开裂情况,不同道路模型中最大主应力与系统能量如表 2 所示。

表 2 不同间距下裂缝开裂情况

Tab. 2 Cracking situation with different crack spacing

裂缝间距/m	最大主应力/MPa	系统总能量/($\text{N}\cdot\text{m}$)
1	0.163 5	145
2	0.184 6	227
4	0.354 8	258
5	0.257 4	305
10	0.657 8	852
15	1.126	1 452

对表 2 进行函数拟合,可以得出表面最大主应力 $S_{\max}$ 随裂缝间距 D 呈指数增长:

$$S_{\max} = 0.21 \times e^{D/8.8}, \quad (8)$$

系统总能量 E 随裂缝间距 D 呈指数增长:

$$E = 170.9 \times e^{D/6.9}. \quad (9)$$

从能量的观点来看,采用预裂缝技术人为的促使多条微细裂缝产生,裂缝间距变小,释放了早期收缩蓄积的大部分收缩能量,从而使得基层系统的能量降低,趋于最稳定的状态;同时也表明,条数多,宽度小的裂缝分布模式比条数少、宽度大的裂缝分布模式要好。

5 结论

养护期间,采用振动压路机进行碾压,能较好的控制网状细裂缝的发生和发展,从而可以大大释放收缩应力,避免宽或长等严重裂缝的产生,却对基层的强度没有明显的影响,从而可以减少甚至避免反射裂缝的产生。预裂缝施工后,相当于采用基层网状细裂缝代替了基层宽裂缝,许多研究表明^[12],当基层的裂缝宽度小于 2.5 mm ,裂缝仍然具有良好的传递荷载的能力。从能量的角度看,预裂缝技术释放了早期水泥稳定碎石基层内部由于干缩

和温缩蓄积的部分能量, 根据能量最小原理, 系统的能量越小, 系统越稳定。基于能量法的内聚力模型能较好的模拟裂缝, 很好的解释了预裂缝技术的本质机理, 为预裂缝技术的应用提供了良好的理论基础。

参考文献:

References:

- [1] 王艳, 倪富健, 李强, 等. 水泥稳定碎石基层横向收缩裂缝控制研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 45-49.
WANG Yan, NI Fujian, LI Qiang, et al. Study on Controlling of Transverse Shrinkage Cracking in Cement Stabilized Macadam Base [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (2): 45-49.
- [2] SCULLION T. Field Investigation: Pre-cracking of Soil-cement Bases to Reduce Reflection Cracking [C] //TRB 81st Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2002: 1-10.
- [3] SEBESTA S, SCULLION T. Effectiveness of Minimizing Reflective Cracking in Cement-Treated Bases by Microcracking, Report 0-4502-1 [R]. Texas: Texas A&M University, 2004.
- [4] CHEN G, BAKER G. Analytical Model for Predication of Crack Spacing due to Shrinkage in Concrete Pavements [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (10): 1529-1533.
- [5] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6: 773-782.
- [6] SONG S H, PAULINO G H, BUTTLAR W G. Simulation of Mode I And Mixed-mode Crack Propagation in Asphalt Concrete Using A Bilinear Cohesive Zone Model [C] //TRB 84th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2005: 1-17.
- [7] 石亦平. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
SHI Yiping. Detailed Description of ABAQUS Finite Element Analysis Example [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [8] SHET C, CHANDRA N. Analysis of Energy Balance When Using Cohesive Zone Models to Simulate Fracture Processes [J]. ASME Journal of Engineering Material and Technology, 2002, 124: 440-450.
- [9] 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 Yongli, 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.
- [10] ASHRAF M, ABD EL-RAHIM, GEORGE P K. Optimum Cracking for Improved Performance of Cement-Treated Bases [C] //TRB 78th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1999: 1-21.
- [11] NI Fujian, LI Qiang, GU Xingyu, et al. Prediction Model for Shrinkage Cracking Spacing of Cement Stabilized Base [C] //TRB 87th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2008: 1-17.
- [12] WAYNE S, DAVID R. Control of Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements [C] //The 5th International RILEM Conference. Limoges, France: RILEM Publications, 2004.

(上接第19页)

- [6] 陈波, 张亚梅, 陈胜霞, 等. 橡胶混凝土性能的初步研究 [J]. 混凝土, 2004 (12): 37-39.
CHEN Bo, ZHANG Yamei, CHEN Shengxia, et al. Fundamental research of Properties of Rubberized Concretes [J]. Concrete, 2004 (12): 37-39.
- [7] 李悦, XI Yunping. 橡胶集料水泥砂浆和混凝土的性能研究 [J]. 混凝土, 2006 (6): 45-48.
LI Yue, XI Yunping. Study on the Properties of Portland Cement Mortar and Concrete Containing Crumb Rubber Aggregate [J]. Concrete, 2006 (6): 45-48.
- [8] 李悦, 王玲. 橡胶集料混凝土研究进展综述 [J]. 混凝土, 2006 (4): 91-94.
LI Yue, WANG Ling. The Research Progress of Portland Cement Concrete Containing Crumb Rubber [J]. Concrete, 2006 (4): 91-94.
- [9] ALBANO C, CAMACHO N. Influence of Scrap Rubber Addition to Portland I Concrete Composites: Destructive and Non-destructive Testing [J]. Composite Structures, 2005, 71 (3): 439-446.