

加筋延缓沥青路面反射裂缝的疲劳损伤分析

Fatigue damage analysis of the reinforcement delaying reflective cracking of asphalt pavement

周志刚

(长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076)

关键词: 疲劳损伤; 反射裂缝; 沥青路面; 加筋

中图分类号: U 414⁺.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)02-0239-04

作者简介: 周志刚(1966-), 男, 1991 年毕业于清华大学, 2003 年于中南大学获博士学位。长沙理工大学教授, 博士生导师。从事道路工程结构理论、评估与加固等方面的研究。

0 前 言

国内外试验研究和基于断裂力学的理论研究分析表明^[1-5], 土工布、玻璃纤维格栅等加筋材料可有效地防止半刚性基层沥青路面反射裂缝。研究中均假定材料内部裂缝是一条线状的损伤断裂带, 裂缝两侧的材料不连续, 但各自仍为均匀连续介质, 而事实上, 裂缝的形成是由于材料在各类荷载作用下内部逐渐出现损伤劣化, 这种损伤劣化可能呈现为不均匀分布, 当某处达到损伤容限时, 该处材料将首先出现微裂纹, 其后不断发展的微裂纹汇聚形成宏观裂缝。此时宏观裂缝周围材料已出现损伤劣化, 裂缝周围损伤区以外才是平常所认为的弹性区, 材料的力学行为与损伤前均匀材料的力学行为会存在较大差异。损伤力学正是基于这一事实在材料力学、断裂力学基础上发展建立形成的一门独立的学科分支, 它更适于真实地揭示沥青混合料和沥青类路面结构损伤断裂破坏机理^[6-9]。为了进一步认识半刚性基层沥青路面反射裂缝开裂机理, 应用加筋材料防治其破坏的机制, 本文采用疲劳损伤理论与方法分析含半刚性基层裂缝的沥青面层疲劳损伤演化过程, 探讨加筋材料对沥青面层的抗裂机理及效果。

1 疲劳损伤力学 - 有限元方法

在疲劳损伤力学理论中, 疲劳损伤演化方程为

$$\frac{dD}{dN} = a^* \left(\frac{\sigma_e}{1-D} \right)^p (1-D)^{-q}, \quad (1)$$

式中 D 为损伤度, $0 \leq D \leq 1$; N 为疲劳作用次数 (疲劳寿命); 等效应力变程 $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$, s_{ij} 为应力偏量分量的变程, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \delta_{rs} \sigma_{rs}$; a^* , p , q 为材料的疲劳损伤特性参数, 与载荷循环特征 R 及温度 T 有

关。根据结合疲劳试验结果的疲劳损伤分析比较, 取 $q=0$ 。

对于所分析的问题, 按照平面应变问题处理, 此时有限元方法中的本构关系方程为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-D)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1+\mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

在 8 节点等参单元有限元格式中, 引入考虑损伤的弹性矩阵 $\{S\}$,

$$\{S\} = \frac{E(1-D)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1+\mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

疲劳损伤力学 - 有限元方法中其它计算方程与一般有限元方法一样。对于加筋材料, 采用文献[5]提出的薄膜单元。

在进行疲劳损伤分析与裂纹形成及扩展寿命预估时, 以 (0) 与 (n) 分别代表疲劳裂纹形成以及扩展过程中危险点 (即临界点) 的有限单元编号, 预估裂纹形成与扩展寿命。模拟计算中不固定裂缝的扩展方向, 根据任意点的损伤度值是否达到 1.0 而定。详细过程参见文献[10]。

利用自编的有限元程序计算了不同增长步长 $\Delta D=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ 下的疲劳损伤, 结果表明均能取得良好的精度, 故本文有限元计算中均取 $\Delta D=0.02$ 的增长量步长。

2 结构计算模型

沥青路面结构选用常用的 4 层体系结构: 沥青面

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50178012); 湖南省自然科学基金资助项目 (04JJ3030)

收稿日期: 2004-02-16

层厚 18 cm; 半刚性基层厚 20 cm, 模量 1400 MPa; 底基层厚 25 cm, 模量 300 MPa; 土基模量 40 MPa。半刚性基层含贯穿裂缝。荷载为偏载, 作用在裂缝上方左侧路表, 其强度为 0.7 MPa。

根据室内沥青路面分析仪 (APA) 疲劳试验^[10], 沥青面层材料的力学参数取: 弹性模量 $E=1350$ MPa; 疲劳损伤特征参数 $p=3.24$, $a^*=7.039 \times 10^{-6}$ 。

沥青路面结构包括无筋结构和加筋结构两类。其中加筋结构是在已开裂的半刚性基层与其上沥青面层间铺设一层加筋材料, 加筋材料的张拉模量 $E_g=0.1$, 0.5 MN/m。

3 疲劳损伤分析

3.1 应力分布

根据不同疲劳损伤阶段半刚性基层裂缝延长线上正应力 σ_x 和剪应力 τ_{xz} 的分布曲线, 不同疲劳损伤阶段应力变化较大的区域为面层下部裂缝尖端附近 2 ~ 4 cm 范围, 而离表面区域应力变化不大。在损伤前, 裂缝尖端附近存在着明显的应力集中现象, 但随着损伤程度的加深、损伤区的扩大, 应力集中现象减弱。沥青面层表面应力的波动与表面出现的损伤有关。

值得注意的是, 在偏载作用下, 裂缝延长线上正应力 σ_x 始终为负, 处于受压状态。针对对称加载情形进行疲劳损伤分析得到同样的结果。因此, 对于交通荷载下的半刚性基层裂缝, 裂缝延长线上损伤区的发展主要归因于剪应力的作用。

图 1 为无损伤时沥青面层底部正应力 σ_x 的分布, 在较长的疲劳损伤阶段, 其分布规律相似。它清楚地表明, 裂缝附近沥青层内存在着应力集中现象, 很小的区域内正应力 σ_x 发生急剧变化, 由裂缝右侧 (非加载边) 的极大负值转变为裂缝左侧 (加载边) 的较大正值 σ_1 。随着疲劳加载的进行, 对于无筋和加筋的沥青路面结构, 这一弯拉应力 σ_1 呈现出不同的变化趋势 (见图 2)。对于无筋的沥青路面结构, 在较长时间内 (约 160000 次循环加载), 沥青面层底部一直存在弯拉应力, 只是其值随着疲劳损伤程度的加深而逐渐减弱。而对于加筋的沥青路面结构, 沥青面层底部的弯拉应力存在的时间较短 (约 75000 次循环加载), 这正是加筋材料起到了加筋作用, 改变了损伤区的应力分布状态, 相应延长了沥青面层的使用寿命。

3.2 路表弯沉

在沥青路面设计、使用中人们一般重视路表弯沉 (垂直位移), 因为它集中体现了沥青路面结构内部状况。图 3 显示了在偏载下沥青路面表面弯沉盆的变化。不同疲劳加载次数的路表弯沉盆的变化区域主要集中

在约 50 cm 直径范围内。同时, 弯沉盆的最大值 $W_{\max}$ 随着循环加载次数的增加逐渐增大, 见图 4。

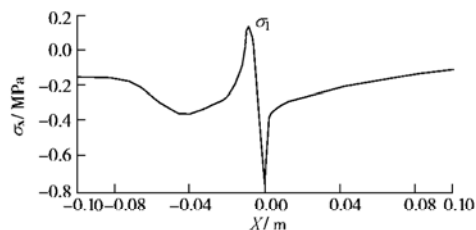


图 1 沥青面层底部正应力 σ_x 分布 ($N=1$)

Fig. 1 Distribution of normal stress σ_x at the bottom of asphalt surface

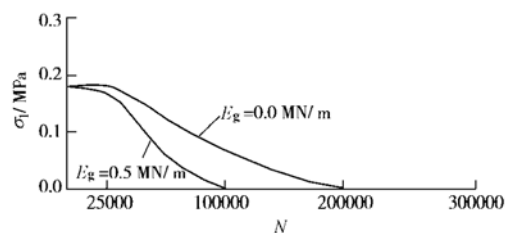


图 2 沥青面层底部弯拉应力 σ_1 随疲劳损伤的变化

Fig. 2 Bending stress σ_1 in the bottom of asphalt surface varying with fatigue damage

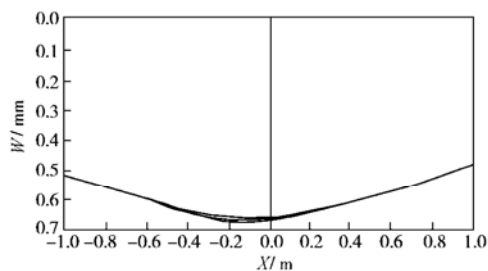


图 3 沥青路面表面弯沉盆

Fig. 3 Displacement basin of asphalt surface

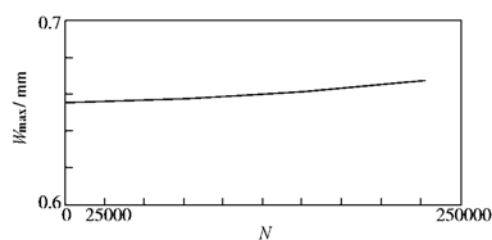


图 4 最大弯沉值 $W_{\max}$ 随循环加载次数 N 的变化

Fig. 4 The maximum displacement $W_{\max}$ varying with the number N of repeated loading cycles

3.3 损伤场

损伤度 D 在结构内部的分布 (损伤场) 能真实地反映结构内部空洞、裂缝等缺陷的萌生、发展过程。图 5、6 分别为无筋和加筋 ($E_g=0.5$ MN/m) 沥青路面结构在不同循环加载次数下裂缝起裂, 损伤区发展过程中其面层内损伤场图。

损伤场图表明, 由于半刚性基层裂缝尖端附近沥

青面层底部的应力集中, 首先在该区域萌发损伤, 导致裂缝的起裂。随着循环加载次数的增多, 损伤破坏区逐渐向上、向加载区下沥青面层内发展。由于有限元计算以沥青面层表面出现损伤破坏区为终止依据, 结果表明, 就本文所完成的计算, 对于交通荷载下的沥青路面反射裂缝问题, 沥青面层开裂的起因是半刚性基层裂缝造成沥青面层底部应力集中。损伤破坏的发展属于一种压剪破坏形式, 即形成一条从半刚性基层裂缝尖端斜向加载区内路表的损伤破坏带。当裂缝(损伤破坏带)向上发展接近沥青面层表面时, 路表先出现裂缝破坏, 在与沥青面层内部的裂缝融汇, 形成贯穿裂缝。对于对称荷载下的沥青路面所开展的疲劳损伤分析也得到同样的结果。由于沥青路面是承受从左至右运动的交通荷载, 考虑一次交通荷载会先后作用于半刚性基层裂缝延长线上左右两侧的路表, 对偏载下的损伤区进行叠加(并不为简单的线性叠加), 可以想象到, 半刚性基层裂缝将垂直向上发展, 造成一定宽度范围内沥青面层的破坏。

对比无筋和加筋沥青路面损伤场, 可以发现, 由于加筋材料在裂缝附近的局部增强约束作用, 在裂缝的右侧始终存在受压区, 未出现拉剪损伤现象。无筋沥青路面裂缝前沿的损伤区分布范围较大, 损伤程度更为明显。

损伤场图中(图5, 6)在荷载作用下的沥青混凝土面层内大部分区域为受压无损或损伤轻微(浅色区)。

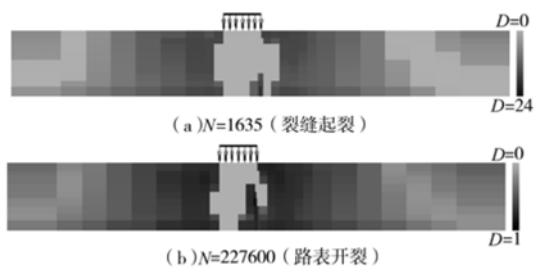


图5 无筋沥青路面结构面层内损伤场的变化

Fig. 5 Variation of the damage in the asphalt surface without reinforcement

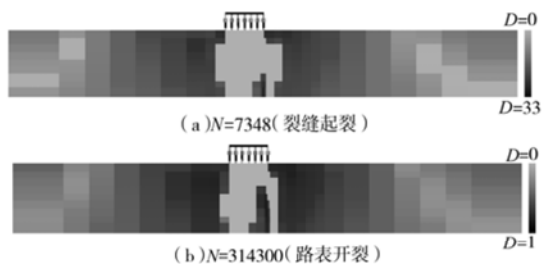


图6 加筋沥青路面结构面层内损伤场的变化

Fig. 6 Variation of the damage in the asphalt surface with reinforcement

3.4 加筋作用

加筋材料在对沥青面层起加筋作用时, 其初期拉力分布如图7所示, 呈现为双峰曲线形式。随着循环加载次数的增加, 双峰值 T_1 , T_2 均逐渐减小, 见图8。特别对于 T_1 峰值, 在经受约 20000 次循环加载后即衰减为零值, 加筋材料拉力分布转为单峰曲线。而 T_2 峰值保持了较长时间才衰减为零值。这是由于损伤破坏区的发展, 造成加载区下沥青面层底部小范围内形成向半刚性基层裂缝位置方向滑移的趋势, 使得加筋材料在裂缝处逐渐变为受挤压, 而旁边区域的加筋材料受到张拉作用。图7表明, 加筋材料发挥作用的范围大约为 10 cm 宽区域。

关于无筋和加筋沥青路面结构的疲劳损伤分析结果表明, 在沥青面层与半刚性基层之间铺设加筋材料, 的确可以改善沥青面层内的受力状态, 延缓损伤破坏区的发展, 相应延长沥青面层的疲劳寿命。计算结果显示, 沥青面层底部起裂时, 无筋和加筋沥青路面所承受的循环加载次数分别为: 无筋 $N=1635$, 加筋 $N=7257$ ($E_g=0.1$ MN/m), 加筋 $N=7348$ ($E_g=0.5$ MN/m); 疲劳损伤破坏区贯穿沥青面层表面时, 无筋和加筋沥青路面所承受的循环加载次数分别为: 无筋 $N=227600$, 加筋 $N=291100$ ($E_g=0.1$ MN/m), 加筋 $N=314300$ ($E_g=0.5$ MN/m)。铺设张拉模量 $E_g=0.1, 0.5$ MN/m 的加筋材料, 分别可以将沥青面层的疲劳寿命延长至 1.28, 1.38 倍。

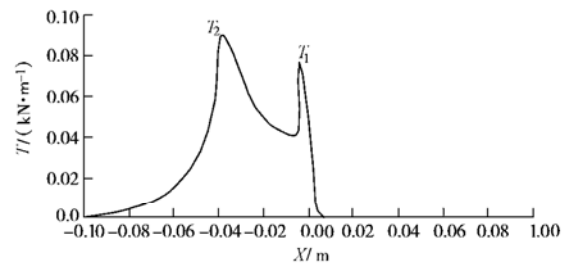


图7 加筋材料拉力分布 ($E_g=0.5$ MN/m)

Fig. 7 Distribution of tension force of reinforcement ($E_g=0.5$ MN/m)

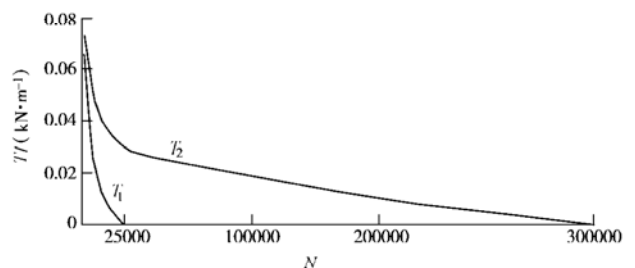


图8 加筋材料拉力峰值 T_1 , T_2 的变化

Fig. 8 Variation of the peak values T_1 , T_2 of tension forces of reinforcement

4 结 语

本文运用疲劳损伤力学-有限元方法对半刚性基层沥青路面疲劳破坏过程及加筋材料延缓沥青路面开裂的作用进行了系统研究,得到以下主要结论:

(1) 沥青面层底部裂缝尖端附近的应力集中现象随着损伤程度的加深、损伤区的扩大而减弱。无论偏载或对称加载,裂缝延长线上正应力 σ_x 始终为负,处于受压状态,裂缝延长线上损伤区的发展主要归因于剪应力的作用,沥青面层损伤断裂属于一种压剪破坏过程。并且,当沥青面层内部裂缝向上扩展后期,路表先出现裂缝,再与其内部裂缝融汇,形成贯穿裂缝。

(2) 对比无筋和加筋沥青路面,加筋材料在裂缝附近存在局部增强约束作用,在裂缝的右侧始终存在受压区,未出现拉剪损伤现象,而无筋沥青路面裂缝前沿的损伤区分布范围较大,损伤程度更为明显。这表明加筋能约束沥青面层底部损伤区的范围及损伤区向上发展速度,从而延长沥青面层寿命。并且,加筋材料发挥作用的范围大约为 10 cm 宽区域。

参考文献:

- [1] Pickett D L, Lytton R L. Laboratory evaluation of selected fabrics for reinforcement of asphalt concrete overlay [R]. Texas Transportation Institute, 1983.
- [2] Lytton R L, Jaywickrama P W. Reinforcing fibric glass for asphalt overlays[R]. Texas Transportation Institute. 1986.
- [3] Molenaar A A A. Effects of Mix Modifications, Membrane Interlayers and Reinforcements on the Prevention of Reflective Cracking of Asphalt Overlays[A]. Proc Int RILRM Conf On Reflective Cracking in Pavements[C]. 1989:225 - 232.
- [4] Zhou Zhi-gang, Zheng Jian-long. The effect of geosynthetics materials in preventing asphalt pavement from reflective cracking[A]. 7th International Conference of Geosynthetics [C]. France, 2002:963 - 966.
- [5] 周志刚, 张起森, 郑健龙. 加筋材料阻止沥青路面反射裂缝的桥联增韧的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33 (1): 93 - 99.
- [6] 张 行, 赵 军. 金属构件应用疲劳损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [7] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [8] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [9] 蔡四维, 蔡 敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [10] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤断裂研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.

TU 建筑科学类核心期刊表

[编者按] 本表摘自北京大学出版社 2004 年出版的《中文核心期刊要目总览》(第 4 版)第 83 页。《总览》1992 年初版,以后每 4 年改版一次,每一版都对入编期刊做一定增删、调整。《总览》收录了我国各学科发表论文较多,文摘率、引文率、读者利用率相对较高,在本学科学术水平较高、影响力较大的期刊。

序 号	刊 名	序 号	刊 名	序 号	刊 名
1	岩土工程学报	1 1	施工技术	2 1	西安建筑科技大学学报. 自然科学版
2	建筑结构学报	1 2	建筑技术	2 2	水文地质工程地质
3	土木工程学报	1 3	世界建筑	2 3	建筑机械
4	岩石力学与工程学报	1 4	建筑科学	2 4	四川建筑科学研究
5	建筑结构	1 5	世界地震工程	2 5	重庆建筑大学学报
6	工业建筑	1 6	建筑学报	2 6	新型建筑材料
7	哈尔滨建筑大学学报	1 7	混凝土	2 7	空间结构
8	中国给水排水	1 8	工程勘察	2 8	城市规划汇刊
9	岩土力学	1 9	城市规划		
1 0	建筑技术通讯. 给水排水(改名为: 给水排水)	2 0	暖通空调		