

# 加铺层厚度对冲击压实改建路面力学性能的影响\*

胡玲玲<sup>1</sup>, 苏卫国<sup>2</sup>, 卢辉<sup>3</sup>, 钟志勤<sup>1</sup>  
(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东广州 510275;  
2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东广州 510640;  
3. 广州市公路开发公司, 广东广州 510080)

**摘要:** 采用三维有限元方法研究冲击压实技术改建后的白加黑路面的受力机制, 讨论加铺的水泥稳定基层和沥青砼面层的厚度分别对改建路面的受力性能和使用性能的影响。计算结果表明: 冲击压实改建路面在轮载作用下加铺层与破裂水泥砼板块间会出现脱空, 是此种路面结构所特有的工作模式; 在交通荷载下, 加铺的沥青砼底面容易产生横向疲劳裂缝, 从而在沥青砼面层中形成由下而上的反射裂缝, 而受轮载直接作用的沥青砼表面并不容易损坏; 面层所受的应力极值随加铺层厚度的增加呈线性减小; 增加加铺层厚度能够明显减少由交通荷载引起的路面开裂, 并且增加水稳层厚度比增加面层厚度更为经济有效; 但增加加铺层厚度对改善沥青砼面层抗车辙能力的效果不显著。

**关键词:** 加铺层; 路面; 冲击压实; 力学性能; 有限元

**中图分类号:** U416.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)06-0042-06

## Influence of Overlays' Thickness on the Mechanical Properties of Asphalt Pavement Based on Broken-and-Fixed Concrete

HU Lingling<sup>1</sup>, SU Weiguo<sup>2</sup>, LU Hui<sup>3</sup>, ZHONG Zhiqin<sup>1</sup>

(1. Department of Applied Mechanics & Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou Highway Development Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** By employing the three-dimensional finite element method, the working mechanism of white-and-black pavement treated by impact compaction was studied, and then the influence of the overlays' thickness on the mechanical properties of the new asphalt concrete layer (AC) was explored. The simulation results show that a gap will appear between the overlay and the broken existed concrete slab under the wheel load, which is the special working mechanism of the recovered pavement. Under traffic load the potential cracks will rise transversely at the bottom of AC, while the asphalt surface is undestroyed although it is directly suffered from the wheel load. The maximal stress in AC decreases linearly with the increase of the overlays' thickness, either AC or the cement treated base (CTB). The pavement cracks would be efficiently decreased with the increase of the overlays' thickness, especially with the increase of CTB's thickness. However, the effect is not evident in improving the rutting resistance of AC by increasing the thickness of the overlays.

**Key words:** overlay; pavement; impact compaction; mechanical properties; finite element method

\* 收稿日期: 2009-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10802100); 广东省交通厅科技资助项目(2006-18); 中山大学青年教师科研启动基金资助项目

作者简介: 胡玲玲(1980年生), 女, 工学博士, 讲师; E-mail: hulingl@mail.sysu.edu.cn

近年来,采用冲击压实技术修复旧水泥混凝土路面,以其良好的实用性,引起了公路养护部门的关注。该技术采用多边形钢轮冲击压实机,当机器行走时,轮轴反复升落,以低频率连续周期性的高振幅冲击力冲击混凝土板块,在击破旧面板的同时将其夯实稳固到基层上,并对旧路基进行补充压实,形成嵌锁稳固的新路面底基层;之后在破裂稳固的旧砼层(以下简称“破裂混凝土层”)上加铺新路面<sup>[1-2]</sup>。该技术能够充分利用旧水泥混凝土路面板,在破裂与稳固旧面板、提高路基强度和稳定性,以及提高工作效率、降低工程成本、满足环保要求等方面,较之传统做法能有很大改善<sup>[3-4]</sup>。

胡昌斌<sup>[5-6]</sup>、唐学军等<sup>[7-8]</sup>对冲击压实过程中旧砼板的破坏机理和影响因素进行了研究,刘荣、黄晓明等<sup>[9]</sup>探究了冲击压实后加铺路面的结构计算程序。作为一项新兴技术,我国对冲击压实后加铺结构的设计还缺乏相应的规范和充足的经验,对改建路面力学性能和使用性能的影响因素认识不足。本文正是针对此问题,采用 ANSYS 有限元软件,对冲击压实改建路面进行三维有限元分析,研究其特有的受力机制,讨论加铺层(包括沥青混凝土面层和水泥稳定基层)厚度对改建路面受力性能和使用性能的影响,以期对工程实践以及制定相应的设计规范有所参考。

## 1 力学模型及材料参数

模型的建立根据广东省某路段的实际情况,将改建后的路面结构简化为四层:沥青混凝土面层、水泥稳定基层(以下简称“水稳层”)、破裂混凝土层以及土基。其中破裂混凝土层厚 24 cm,土基厚 5 m,而新加铺的沥青砼层和水稳层各采用了 3 种不同厚度,并据此将路面结构分为 2 组,如表 1 所示。第一组路面结构的沥青砼层厚度相同(18 cm),但水稳层厚度不同,分别为 17 cm, 20 cm 和 23 cm;第二组路面结构的水稳层厚度相同(20 cm),但沥青砼层厚度不同,分别为 18 cm、20 cm 和 22 cm;两组共包含了 5 种路面结构。模型总的平面尺寸为 3.5 m × 3.5 m,冲击断裂后的旧砼板一般处于亚米量级<sup>[10]</sup>,因此将断裂板块简化为 0.5 m × 0.5 m 的正方形,共包括 7 × 7 = 49 块。作为最不利情况<sup>[9]</sup>,允许各相邻结构层间有相对滑动,层间只可传递压力,不能传递拉力;破裂混凝土层中的断裂板块之间假设为光滑接触,不考虑它们之间的嵌锁作用。

表 1 各路面结构中水泥稳定基层和沥青砼面层的厚度

Table 1 Thickness of CTB and AC in various pavement structures

	路面结构编号	水稳层厚度/cm	沥青砼层厚度/cm
第一组	1 <sup>#</sup>	17	18
	2 <sup>#</sup>	20	18
	3 <sup>#</sup>	23	18
第二组	2 <sup>#</sup>	20	18
	4 <sup>#</sup>	20	20
	5 <sup>#</sup>	20	22

双轮荷载 50 kN 的等效面力作用在面板中间位置,如图 1 所示。考虑到模型与荷载均关于 I-I 和 II-II 对称轴对称,计算时可取 1/4 模型进行分析,如图 2 所示,相应的加载位置如图 3 所示。在 1/4 模型的对称平面设置对称边界条件,另外 2 个侧面限制其沿平面法线方向的位移,土基底面为固定约束。

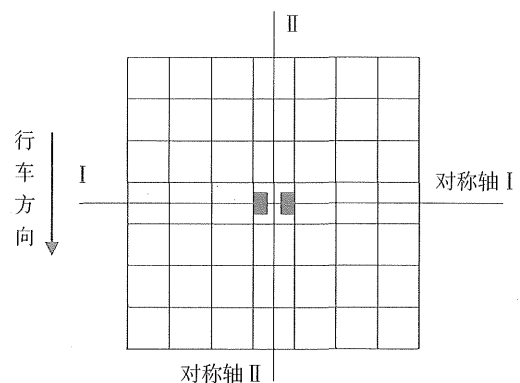


图 1 面力的作用位置

Fig. 1 The position of the wheels' pressure

假设各结构层为均质、连续、各向同性材料,其中沥青混凝土面层、水泥稳定基层和破碎混凝土层均假设为线弹性材料;土的变形规律复杂,具有明显的非线性性质,本文采用 Drucker-Prager 模型来模拟,该模型稳定且符合 Drucker 对于稳定性和唯一解的所有要求,对包括单调荷载的问题可以得到相对精确的结果。各层材料物理参数的选取主要依据广东省水泥混凝土路面的取芯试验结果,并参考相关规范<sup>[11]</sup>,如表 2 所示。

为提高计算精度,水泥稳定基层和碎化混凝土层采用 concrete 65 实体单元,该单元能够较好的模

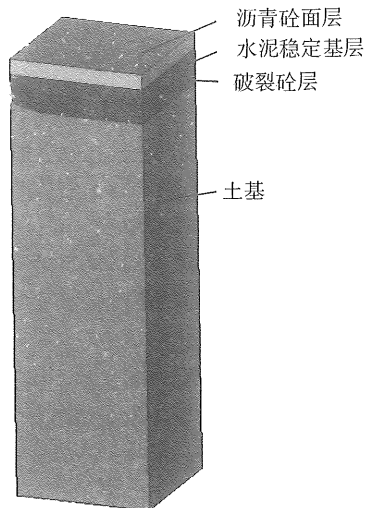


图 2 路面结构的 1/4 模型

Fig. 2 A quarter of the pavement model

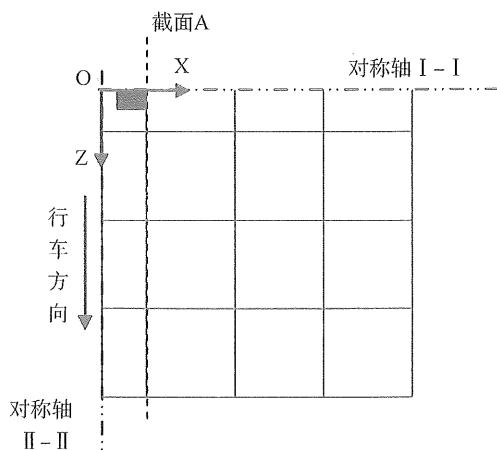


图 3 四分之一模型中的加载位置

Fig. 3 The position of the wheels' pressure in a quarter of the model

拟水泥混凝土的变形及开裂；沥青混凝土面层和土基采用 solid95 实体单元。路面结构中各层之间的界面接触通过非线性接触单元 contact174 和 target170 来模拟，经优化后模型共包括 22 个非线性面-面接触对。

表 2 各层材料材料参数

Table 2 Parameters of the material

	杨氏模量/Mpa	泊松比
沥青混凝土面层	1 400	0.35
水泥稳定基层	1 500	0.25
碎化混凝土层	28 000	0.17
土基	35	0.35

c = 15 kPa;  $\varphi = 14.5^\circ$ ;  $\beta = 10^\circ$

## 2 基本结果

### 2.1 改建路面的工作机理

冲击压实技术改建后的白加黑路面在双轮荷载下各结构层的变形如图 4 所示，可以看出断裂混凝土层中断裂板块间产生了错台，从而导致加铺层与断裂水泥砼板块之间出现脱空现象，这是该类路面所特有的变形模式。断裂板块间的错台会在加铺层底面出现应力集中并使其承受较大的剪应力，从而影响到沥青砼面层的使用性能。工程中往往通过增加水稳层和沥青砼面层的厚度来减小该不利影响，但这同时又带来了经济效益的降低。因此，我们需要清楚地认识加铺层厚度对修复后的路面受力状况及使用性能的影响，从而在保证路面使用性能的前提下降低工程成本。

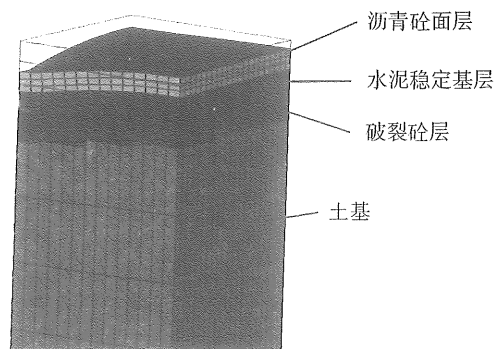


图 4 路面结构在车载作用下的变形图

Fig. 4 Deformation of the pavement structure under the wheel load

### 2.2 加铺层的层底拉应力

在轮载作用下，各层路面板均可看作支撑在弹性地基上的受弯板，并且荷载作用位置弯矩最大。该弯矩会使加铺层底面产生较大的弯拉应力，在此应力反复作用下有可能使加铺层产生弯拉疲劳破坏。图 5 给出了 2# 路面结构 I-I 对称截面上，面载中心和面载左右两侧的弯曲正应力  $\sigma_x$  (沿 x 方向/横向) 和  $\sigma_z$  (沿 z 方向/行车方向) 分别沿加铺层厚度的变化，其中正值表示拉应力，负值表示压应力。可见沥青砼面层和水泥稳定基层中的  $\sigma_x$  和  $\sigma_z$  分别沿其厚度呈近似线性变化，自上而下由压应力逐渐变为拉应力。沥青砼面层和水泥稳定基层的层底均会出现沿路面横向和纵向的弯拉应力，但沥青砼层底的弯拉应力较水泥稳定基层层底大，并且荷载中心对应的弯拉应力要大于荷载左右两侧，即加铺路面中弯拉应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_z$  的最大值均出现在轮载作用中心下方的沥青砼层底。

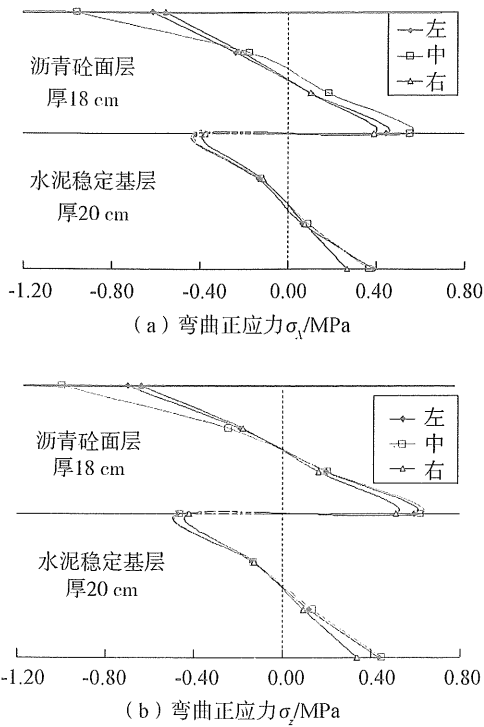


图 5 加铺层中  $\sigma_x$  和  $\sigma_z$  沿厚度的变化  
Fig. 5 Variety of the stress along the thickness of overlays (a)  $\sigma_x$  and (b)  $\sigma_z$

2.3 面层中的剪应力

在高温季节，特别在有自由水侵入面层的情况下，沥青面层内的剪应力是使其产生严重剪切变形及严重辙槽的重要原因<sup>[12]</sup>。剪应力愈大，剪切变形及辙槽愈严重。沥青砼面层在双轮荷载作用下，车轮外侧的截面（图 3 中的截面 A）会产生比较大的剪应力，从而使材料产生剪切流动变形，是形成车辙的内因。图 6 给出了 2<sup>#</sup> 路面结构在车轮荷载下其沥青砼层中截面 A 的剪应力等值线分布图，其它几种路面结构的剪应力分布与之相类似。可见

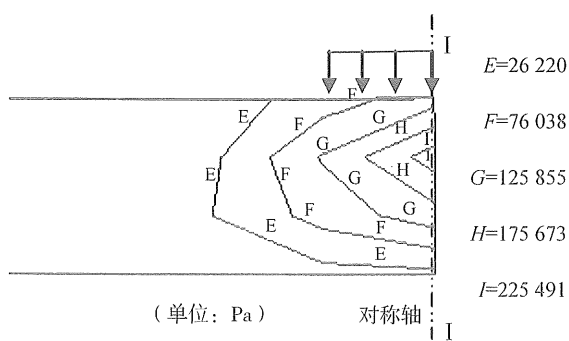


图 6 沥青砼层中截面 A 的剪应力等值线图  
Fig. 6 Contour chart of shear stress in section A of the asphalt concrete layer

剪应力最大区域位于沥青砼的中面层上部，在轮载中心正下方达最大值，并沿水平方向迅速减小，在距荷载中心 0.5 m 处位置，剪应力已减小到只有最大值的 20% 左右。

2.4 面层的等效应力

加铺路面各点除了受弯曲正应力外，还受到剪应力、竖向压应力等作用，在这种复杂应力状态下，可以用 Von Mises 等效应力  $\sigma_e$  来描述它的综合受力情况：

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]}$$

(1)

图 7 给出了路面结构 2<sup>#</sup> 中沥青砼面层 I-I 对称面的等效应力等值线分布图，可见等效应力的最大值位于层底，与最大弯拉应力的位置相对应。而受轮载直接作用的沥青砼表面的等效应力并不大，这是由于其处于三向受压状态， $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  均为负值，而层底的弯曲应力为拉应力（正值），竖向为压应力（负值），因此沥青砼层底承受的等效应力大于路表，在交通荷载下，沥青砼面层更容易产生由下而上的反射裂缝，而受轮载直接作用的沥青砼表面并不容易损坏。

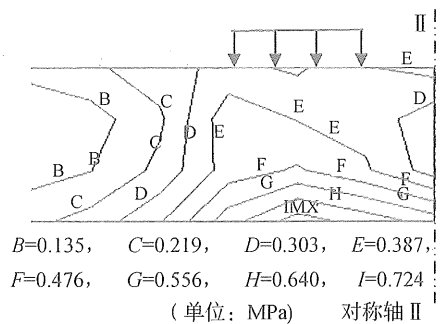


图 7 沥青砼层 I-I 对称面的等效应力等值线图  
Fig. 7 Contour chart of equivalent stress in the symmetry section of I-I of the asphalt concrete layer

3 讨论

在交通荷载作用下，沥青砼面层的损坏与其所承受的应力极值（最大值）相关，应力极值越大，越容易产生疲劳损坏，因此下面将讨论加铺层厚度的改变对沥青砼面层中各种应力的极值和相应的使用性能的影响。分析的应力包括：沥青砼底面沿  $x$  方向的弯拉应力  $\sigma_x$ ，沿  $z$  方向的弯拉应力  $\sigma_z$ ，沥青砼面层中的剪应力  $\tau_{xy}$ ，等效应力  $\sigma_e$  以及第一主

应力  $\sigma_1$ 。其中第一主应力  $\sigma_1$  反映了一点在所有可能的方向中所受的最大拉应力, 研究表明, 对于拉伸主导破坏的材料, 其破坏断裂面总是垂直于第一主应力的方向, 因此第一主应力可作为材料拉伸破坏的判断依据<sup>[13]</sup>。

沥青砼层所承受的最大应力值分别与水稳层厚度和沥青砼层厚度的关系如图 8 所示, 由图可见: ①所分析的 5 种应力都会随加铺的水稳层或沥青砼面层厚度的增加而降低, 说明无论是增加沥青砼的厚度还是增加水泥稳定基层的厚度对面层的受力都

是有益的; ②沥青砼层底沿  $z$  方向的弯拉应力  $\sigma_z$  要大于沿  $x$  方向的弯拉应力  $\sigma_x$ , 并且  $\sigma_z$  与第一主应力  $\sigma_1$  重合, 说明纵向弯拉应力  $\sigma_z$  是沥青砼层底开裂的控制应力, 从而导致沥青砼底面在交通荷载下会最先产生横向疲劳开裂。在现行公路沥青路面设计规范中<sup>[11]</sup>, 也将沥青层层底的弯拉应力作为控制结构层疲劳开裂的设计指标, 因此在下面的分析中将重点讨论与路面开裂相关的弯拉应力  $\sigma_z$ , 以及与车辙相关的剪应力  $\tau_{xy}$ 。

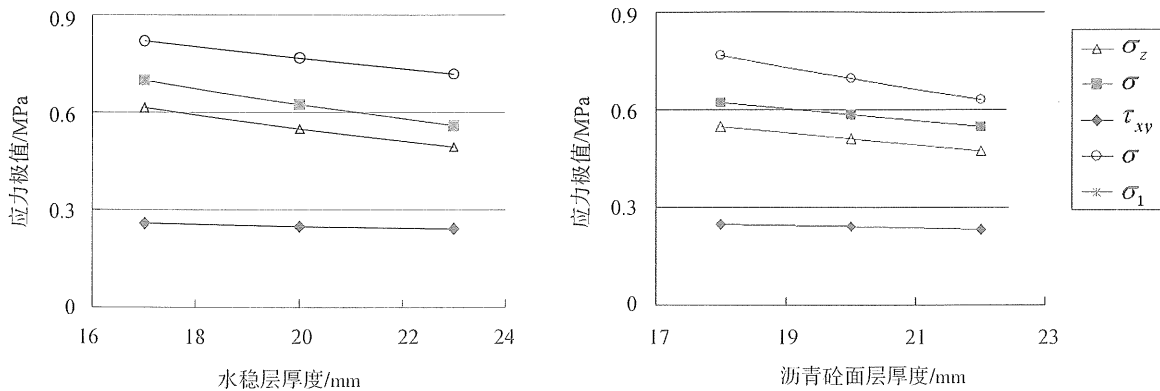


图 8 沥青砼面层承受的应力极值分别随水稳层和沥青砼面层厚度的变化

Fig. 8 Dependence of the maximal stress in asphalt concrete layer on the thickness of CTB and AC

由于水稳层和沥青砼层在路面结构中的作用和厚度范围互不相同, 并且  $\sigma_z$  和  $\tau_{xy}$  所代表的物理含义和评价指标也不同, 为了探讨和比较水稳层厚度和沥青砼层厚度对面层受力的影响程度以及不同应力对加铺层厚度的敏感性, 将所有结构中的应力数值和厚度均以 2<sup>#</sup> 结构为基础进行归一化处理, 如图 9 所示。归一化处理后 2<sup>#</sup> 结构的相对厚度和所有相对应力均为 1, 第一组结构的水稳层厚度除以 20 cm 作为它们的相对厚度, 第二组结构的沥青砼层厚度除以 18 cm 后作为相对厚度, 各结构的应力均除以 2<sup>#</sup> 结构中相应的应力值作为相对应力值。图 9 中, CTB 表示随水稳层厚度的变化曲线, AC 表示随沥青砼层厚度的变化曲线。

由图 9 可以看出, 沥青砼层中的最大剪应力  $\tau_{xy}$  和层底控制弯拉应力  $\sigma_z$  随加铺层厚度的变化均接近线性, 直线的斜率便表示了应力对加铺层厚度的敏感程度, 斜率绝对值越大表示对厚度变化越敏感。图中 4 条直线的斜率关系为  $\sigma_z - \text{CTB} > \sigma_z - \text{AC} > \tau_{xy} - \text{AC} > \tau_{xy} - \text{CTB}$ 。 $\sigma_z$  的斜率较大, 并且  $\sigma_z - \text{CTB}$  的斜率大于  $\sigma_z - \text{AC}$ , 说明对于降低面层中的最大弯拉应力从而减少路面开裂来说, 增加水

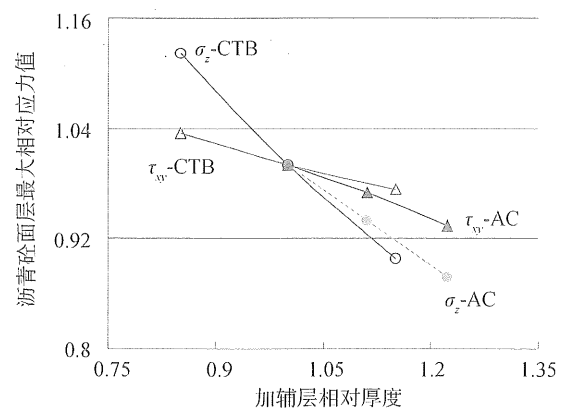


图 9 沥青砼面层相对应力极值随加铺层相对厚度的变化

Fig. 9 Variety of the normalized maximal stress in asphalt concrete layer with the normalized thickness of the overlays

泥稳定基层或沥青砼面层的厚度均能收到明显效果, 相对而言增加水泥稳定基层的厚度更为经济有效。 $\tau_{xy} - \text{AC}$  的斜率大于  $\tau_{xy} - \text{CTB}$ , 说明对于改善沥青砼面层的抗车辙能力来说, 增加面层厚度比增加水稳层厚度更为有益, 但由于二者的斜率都比较

小,说明通过增加加铺层厚度来改善沥青砼面层的抗车辙能力的效果不显著,工程中应结合采用其他方法提高加铺路面的抗车辙性能。

## 4 结 论

(1) 破裂稳固白加黑路面在轮载作用下,破裂混凝土层的断裂板块间会产生错台,从而导致加铺层与断裂水泥砼板块之间出现脱空现象,是该类路面所特有的变形模式。

(2) 车载作用下,纵向弯拉应力 $\sigma_x$ 是沥青砼层底开裂的控制应力,使沥青砼面层产生由下而上的反射裂缝;而受轮载直接作用的沥青砼表面并不容易损坏,因此沥青砼的层底弯拉应力应作为冲击压实改建路面的一项重要设计指标。

(3) 增加加铺层厚度能够明显减少由交通荷载引起的路面开裂,相对而言增加水稳层厚度比增加面层厚度更为经济有效。

(4) 通过增加加铺层厚度从而改善沥青砼面层抗车辙能力的效果不显著,因此工程中应结合采用其他方法提高加铺路面的抗车辙性能。

### 参考文献:

- [1] 苏卫国,汪益敏. 冲击压实技术在修复旧水泥混凝土路面工程中的应用[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2000, 28(6): 85-89.  
SU Weiguo, WANG Yimin. Research on the application of impact compaction technology in rehabilitating engineering of old cement concrete pavement [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2000, 28(6): 85-89.
- [2] 胡昌斌,孙晓亮. 冲击压实破碎旧水泥混凝土路面施工技术试验研究[J]. 公路, 2007, 52(1): 179-187.  
HU Changbin, SUN Xiaoliang. Test research on control standard of rehabilitating cement concrete pavement with impact compaction technology [J]. Highway, 2007, 52(1): 179-187.
- [3] 苏卫国,卢辉. 冲击压实后旧水泥混凝土路面作为垫层及其回弹模量的试验研究[J]. 公路, 2004(11): 72-75.  
SU Weiguo, LU Hui. Test research on the underlay using and the resilient modulus of the old cement concrete pavement after impact compaction [J]. Highway, 2004(11): 72-75.
- [4] 苏新国,鲁圣弟. 冲击压实技术在混凝土路面改建工程中的应用[J]. 公路, 2002(1): 67-70.  
SU Xinguo, LU Shengdi. Application of impact compaction technology on the rebuilding project of cement concrete pavement [J]. Highway, 2002(1): 67-70.
- [5] 胡昌斌. 冲击压路机破碎改建旧水泥混凝土路面技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [6] 胡昌斌,阙云. 冲击碾压动荷载下水泥混凝土路面结构的力学行为[J]. 交通运输工程学报, 2008(4): 40-46.  
HU Changbin, QUE Yun. Mechanical behaviors of cement concrete pavement structure under impact rolling load [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008(4): 40-46.
- [7] 唐学军,苏卫国. 路基刚度对冲击压实旧混凝土路面力学行为的影响分析[J]. 土木工程学报, 2006(4): 121-126.  
TANG Xuejun, SU Weiguo. Influence of sub grade modulus on the mechanical behaviors of existing impact compacted concrete pavement [J]. China Civil Engineering Journal, 2006(4): 121-126.
- [8] 唐学军,苏卫国. 冲击压实旧混凝土路面路基的力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2004(11): 804-808.  
TANG Xuejun, SU Weiguo. Analysis on mechanical behaviors of existing cement-concrete pavement and soil subgrade in the process of impact compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(11): 804-808.
- [9] 刘荣,刘效尧,黄晓明. 水泥混凝土路面改建技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [10] 刘荣,刘效尧,孙江,等. 冲击碾压混凝土路面的破碎尺度[J]. 公路交通科技, 2004(4): 16-19.  
LIU Ying, LIU Xiaoyao, SUN Jiang, et al. Scale of break and seat for portland cement concrete pavement rehabilitation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004(4): 16-19.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [12] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [13] 孙训方,方孝淑,关来泰. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.