

文章编号: 0451-0712(2005)11-0077-04

中图分类号: U418.8

文献标识码: A

# 旧水泥混凝土路面上 沥青混凝土加铺层的力学机理分析

刘海亮, 罗晓辉, 董 军

(北京建筑工程学院土木工程系 北京市 100044)

**摘 要:** 在旧水泥混凝土路面上加铺沥青混凝土层的技术,关键是如何防止反射裂缝。温度荷载与车辆荷载作用所引起的剪切破坏,是沥青混凝土加铺层(AC层)结构产生反射裂缝的主要原因之一。采用三维有限元法对旧水泥混凝土路面上AC层进行了数值模拟分析,重点考察了在车辆荷载作用下接缝处AC层的剪应力与弯沉差,并且分析了加铺层厚度、旧水泥混凝土板的厚度、地基弹性模量等参数对最大剪应力及最大弯沉差的影响。结果表明,合理确定加铺层的厚度,对于预防和控制反射裂缝产生和发展具有重要的作用。

**关键词:** 水泥混凝土路面; 沥青混凝土加铺层; 力学模型; 数值分析

旧水泥混凝土路面上加铺沥青混凝土层是提高旧水泥混凝土路面结构承载力、恢复路面使用性能的有效且经济的修复措施。该措施的技术关键是如何防止和减缓旧水泥混凝土路面板接、裂缝反射至面层而形成反射裂缝。因此,研究和探索反射裂缝出现的机理,裂缝部位各材料的受力情况,以及加铺层厚度、旧水泥混凝土板的厚度、地基弹性模量等参数对最大剪应力和最大弯沉差的影响变得非常重要。

根据力学基本理论,确定了最不利荷载位置,考虑到旧水泥混凝土路面板(PCC板)和沥青混凝土加铺层(AC层)之间的耦合关系,基于弹性力学原理,考虑上下层之间不同材料的关系,建立相关的弹性力学模型,进行了三维有限元数值研究,分析了夹层裂缝和接缝附近的临界响应,研究结果给工程部门正确处理接缝、改进施工工艺和合理设计加铺层提供了重要的理论依据。

## 1 力学模型与数值分析

### 1.1 力学模型

考虑旧PCC板上AC加铺层在车辆荷载作用下接缝处的应力与位移变化,问题属于连续介质中存在裂缝缺陷的问题。为了简化起见,采用弹性力学方法进行讨论,假设:

- (1)各层为均匀的、连续的,且为各向异性的线弹性材料;
  - (2)各层竖向及水平位移连续,且各层相互接触的界面变形连续,无相互相离的现象;
  - (3)不计各层材料的体积力,仅考虑表面竖向荷载的作用。
- 选取任意20 结点八面体实体单元和8 结点四面体实体单元作为有限元分析的基本单元。基于弹性力学有限元基本原理,选取节点位移作为基本变量。考虑等参变换,即有:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^n N_i x_i \\ y = \sum_{i=1}^n N_i y_i \\ z = \sum_{i=1}^n N_i z_i \end{cases}$$

(1)

$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^n N_i u_i \\ v = \sum_{i=1}^n N_i v_i \\ w = \sum_{i=1}^n N_i w_i \end{cases}$$

(2)

式中:  $N_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  为形函数;  $\{X_i^e\} =$

$[x, y, z]^T$  为单元  $e$  内结点坐标;  $\{\delta_i^e\} = [u, v, w]^T$  为单元  $e$  内结点位移。

根据单元上弹性变形体的虚功原理, 单元处于平衡状态, 则外力作用在单元上有微小虚位移所做的功等于弹性体单元上应力在虚应变上所做的虚功, 容易导出<sup>[5]</sup>:

$$\left[ \iiint_{\Omega_e} [B]^T [D] [B] d\Omega \right] \{\delta^e\} = \{R^e\} \quad (3)$$

式中:  $[B]$  为应变矩阵;  $[D]$  为材料的弹性常数矩阵;  $\{\delta^e\}$  为单元结点位移列阵;  $\{R^e\}$  为单元结点外荷载列阵。

## 1.2 力学模型中最不利荷载位置的设置

从简单的力学分析可以知道, 普通的 PCC 板通常是在荷载作用于纵缝边缘中间部位时, 板底会出现最大弯矩。对于在旧 PCC 板上加铺 AC 层的情况, 为了控制 AC 层出现反射裂缝, 此时应考虑将 AC 层应力及竖向位移的最不利状态作为选择临界荷载的依据。因此, 考虑到加铺层最不利车轮荷载情况, 不妨将荷载布置在接缝处沥青混凝土面层的中央<sup>[3]</sup>。

## 1.3 非结点荷载及边界条件的处理

非结点处荷载作用可以利用虚功原理进行荷载等效移置。考虑到在单元上作用有集中力  $\{P\}$ 、面积力  $\{F\}$  和体积力  $\{g\}$ , 与非结点外荷载  $\{R\}$  在任意虚位移上所做的功相等, 可有:

$$\begin{aligned} \{\delta^e\}^T \{R^e\} &= \{\delta^e\}^T \{P\} + \iint_{\Sigma_s} [[N]\{\delta^e\}]^T \{F\} ds + \\ &\iint_{\Omega_e} [[N]\{\delta^e\}]^T \{g\} dV \end{aligned} \quad (4)$$

即有:

$$\begin{aligned} \{R^e\} &= [N]^T \{P\} + \iint_{\Sigma_s} [N]^T \{F\} ds + \\ &\iint_{\Omega_e} [N]^T \{g\} dV \end{aligned} \quad (5)$$

按照实际受力情况, 边界条件设定为:

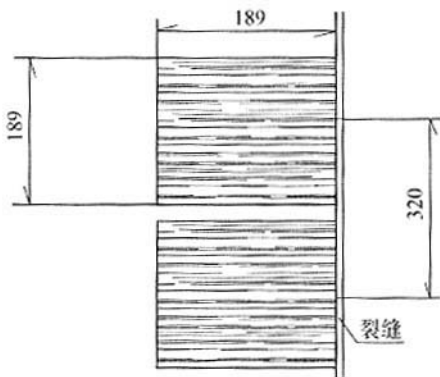
- (1) 地基地面设为固定端, 侧面水平位移为 0;
- (2) 旧水泥混凝土板层在纵向上的位移设为 0, 横向位移自由;
- (3) 沥青混凝土加铺层纵向位移设为 0, 横向位移自由。

## 2 算例分析

### 2.1 几何模型的建立与网格剖分

路面结构从上到下依次是沥青混凝土层、旧水

泥混凝土板层和地基。模型的地基尺寸为  $10.008 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ , 旧水泥混凝土板尺寸为  $5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ , 裂缝宽度为  $8 \text{ mm}$ , 沥青混凝土层为  $10.008 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 。将车轮齐缝布置如图 1 所示, 图 1 中右侧的 2 根竖线表示旧水泥混凝土板的裂缝。荷载作用面积为  $189 \text{ mm} \times 189 \text{ mm}$ , 2 个车轮距离是  $320 \text{ mm}$ 。车轮面荷载为  $0.6 \text{ MPa}$ 。



单位: mm

图 1 车轮荷载布置示意

由于裂缝处的应力比较集中, 是计算仿真中要重点考虑的部位, 不妨在裂缝附近加细剖分网格的密度, 以满足精度的要求。对沥青混凝土和旧水泥混凝土板选择 20 结点的八面体等参单元, 对地基则选择 8 结点四面体等参单元, 如图 2 所示。

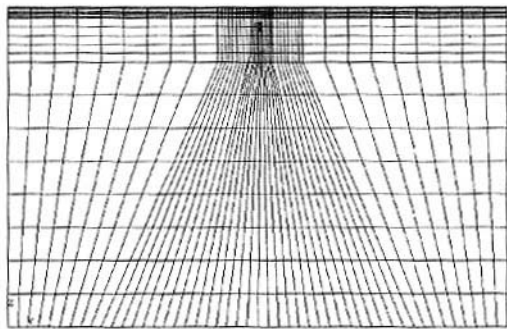


图 2 单元剖分后的模型

### 2.2 模型各材料常数的选取

沥青混凝土加铺层的弹性模量  $E_a = 1\,500 \text{ MPa}$ , 厚度  $h_a$  从  $40 \text{ mm}$  变化到  $160 \text{ mm}$ , 泊松比  $\mu_a = 0.25$ 。旧水泥混凝土板弹性模量  $E_c = 30\,000 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu_c = 0.15$ , 厚度  $h_c$  从  $20 \text{ mm}$  变化到  $28 \text{ mm}$ 。地基模量  $E_s$  从  $100 \text{ MPa}$  变化到  $300 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu_s = 0.35$ 。裂缝宽度为  $8 \text{ mm}$ 。

### 2.3 加铺层应力与位移分析

根据数值计算结果, 随着地基模量  $E_s$  从  $100 \text{ MPa}$

变化到 300 MPa,加铺层最大弯沉差的数值逐渐降低;而针对同一地基弹性模量来说,则随着加铺层厚度的增加,最大弯沉差的数值也在增加,但是随着水泥混凝土板厚度的增加,最大弯沉差数值却在降低。这说明地基和水泥混凝土板对于面层结构性能的变化具有重要的影响,地基和水泥混凝土板的弹性模量数值越高,即刚度越大,对加铺层(AC 层)的受力就越有利;相反,在地基和水泥混凝土板的弹性模量数值不高的情况下,增加加铺层的厚度,就可能带来最大弯沉差数值的增大,对加铺层(AC 层)的受力是不利的。如图 3 所示。

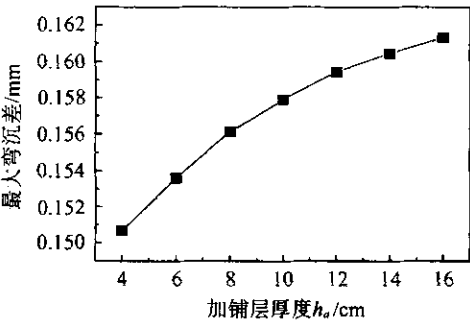


图 3 最大弯沉差随加铺层厚度变化的关系

观察剪应力的变化可以发现,随着地基模量  $E_s$  从 100 MPa 变化到 300 MPa,加铺层的最大剪应力数值逐渐降低;而针对同一地基弹性模量来说,则随着加铺层厚度的增加,最大剪应力数值也在逐渐降低,但是随着水泥混凝土板厚度的增加,最大剪应力数值却在逐渐增加。这说明地基和水泥混凝土板对于路面层结构性能的变化具有重要的影响,地基和水泥混凝土板的弹性模量数值越高,即刚性越大,对加铺层(AC 层)的抗剪能力就越有利;在地基和水泥混凝土板的弹性模量数值不高的情况下,增加加铺层的厚度,同样对加铺层(AC 层)的抗剪能力有利;但可能带来最大弯沉差数值的增大,对加铺层(AC 层)的受力是不利的。如图 4 所示。

从上述规律分析可知,当地基弹性模量增加时,板顶最大弯沉差和最大剪应力数值减小,说明地基刚性越大,整体抗变形能力就越强,对 AC 层受力就越有利。

板缝弯沉差的变化规律也很有特点。如针对不同的地基弹性模量,随着  $E_s$  从 100 MPa 变化到 300 MPa,板缝弯沉差数值逐渐降低;而针对某一地基弹性模量,随着加铺层厚度的增加,板缝弯沉差数

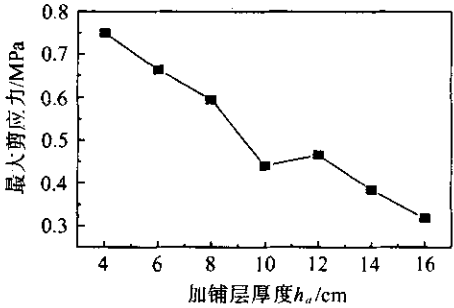


图 4 最大剪应力随加铺层厚度变化的关系

值却逐渐增加;随着水泥混凝土板厚度增加,板缝弯沉差数值达到一定数值后,保持刚性状态,变化甚微。如图 5 所示。

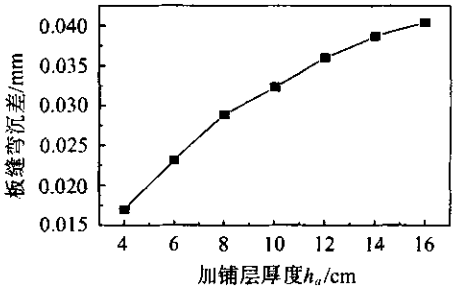


图 5 板缝弯沉差随加铺层厚度变化的关系

针对不同的地基弹性模量,如随着  $E_s$  从 100 MPa 变化到 300 MPa,不同加铺层厚度对应的剪应力变化总体上都是下降趋势。当加铺层厚度在 40 mm 时,随着地基弹性模量的增加,剪应力下降的幅度要大一些;而当加铺层厚度在 160 mm 时,随着地基弹性模量的增加,剪应力下降的幅度要小一些。说明在加铺层厚度增加的情况下,随着地基弹性模量的增加,剪应力减小的幅值变小。如图 6 所示。

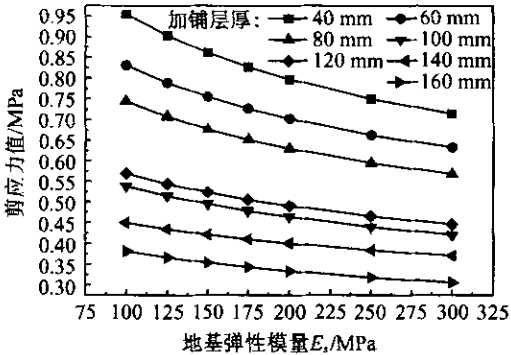


图 6 不同地基弹性模量实施不同加铺层厚度剪应力的变化(旧水泥混凝土板厚度为 200 mm)

针对不同的地基弹性模量,如随着  $E_s$  从 100 MPa 变化到 300 MPa,不同加铺层厚度所对应的板顶最大弯沉差总体上也都是下降趋势,加铺层的厚度从 40 mm 变化到 160 mm 时,下降的趋势基本是一致的。这表明在一定的加铺层厚度下,地基模量越大,板顶的最大弯沉差就越小,如图 7 所示;也说明地基的刚性越大,AC 层的抗变形能力就越大,此时加铺层厚度越大,AC 层的抗变形能力也越大。

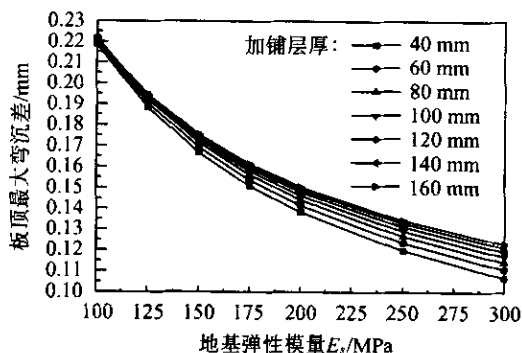


图 7 不同地基弹性模量实施不同加铺层厚度时最大弯沉差的变化(水泥混凝土板厚度为 200 mm)

针对不同的地基弹性模量,如随着  $E_s$  从 100 MPa 变化到 300 MPa,不同加铺层厚度对应的板缝弯沉差总体上变化趋势较为稳定,说明地基的刚性对于板缝弯沉差的变化影响不大。

### 3 结语

根据力学基本理论,确定了最不利荷载位置,考虑 PCC 板和沥青混凝土加铺层之间的耦合关系,基于弹性力学原理,考虑上下层之间不同材料的关系,建立相关的弹性力学模型,进行了三维有限元数值的研究,分析了夹层裂缝和接缝附近的临界响应,研究结果给工程部门正确处理接缝、改进施工工艺和合理设计加铺层提供了重要的理论依据。

### 参考文献:

- [1] 卢正宇, 张起森. 水泥混凝土路面企口接缝的应力分析[J]. 长沙交通学院学报, 1994, 10(3).
- [2] AASHTO. Guide for design of pavement structures [S].
- [3] 胡长顺, 曹东伟. 有防裂夹层结构的旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析[J]. 中国公路学报, 1999, 12(S1).
- [4] 曹东伟, 胡长顺. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1).
- [5] 胡长顺, 王秉纲. 复合路面设计原理与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [6] Kim J. Three-dimensional finite element modeling of multi-layered system [D]. Urbana-Champaign: Univ. of Illinois, 1999.
- [7] Diyar B. Three-dimensional finite element analysis to evaluate reflective cracking potential in asphalt concrete overlays [D]. Urbana-Champaign: Univ. of Illinois, 2002.

## Mechanism Analysis of Mechanics of AC Overlays on Old Cement Concrete Pavements

LIU Hai-liang, LUO Xiao-hui, DONG Jun

(Dept. of Civil Engineering, Beijing Institute of Architecture and Civil Engineering, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A method for improving the carrying capacity and reflection cracks of old cement concrete pavements is to add asphalt concrete overlay on it. Shearing breach which comes from vehicle loads is one of the main reasons for producing reflection cracks of asphalt concrete overlay structure. Aimed at this actual background of project, a numerical modeling analysis of old cement concrete and AC layer is presented by using the finite element method. Shearing and deflection difference of AC layer at the joints are the main consideration, and many other factors (thickness of the cement concrete pavement, thickness of AC, elastic modulus of ground base, etc.) which affect it are analyzed. The results show that it is very important to choose thickness of AC reasonably for preventing and controlling the generation and diffusion of reflection cracks.

**Key words:** cement concrete pavement; asphalt concrete overlay; mechanical models; numerical analysis