

文章编号: 0451-0712(2005)11-0086-04

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

# 沥青混凝土路面层间孔隙水压力计算

罗志刚<sup>1</sup>, 凌建明<sup>1</sup>, 周志刚<sup>2</sup>, 郑健龙<sup>2</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092; 2. 长沙理工大学公路工程学院 长沙市 410076)

**摘要:** 针对沥青混凝土路面水损害问题, 运用轴对称有限元方法分析了不同等级轴载作用下沥青混凝土路面层间孔隙水压力的变化规律。研究表明, 孔隙水压力将造成路面层间的严重冲蚀, 导致沥青与集料过早剥离而诱发水损害, 而超载将加速这一进程。

**关键词:** 沥青混凝土路面; 孔隙水压力; 水损害; 有限元法

许多高等级沥青混凝土路面通车 1~2 年以后, 甚至不到 1 年, 就产生了大量麻面、松散、掉粒、唧浆、坑洞、网裂等破坏现象, 且结构内部剥蚀严重。这不仅迅速削弱了沥青混凝土路面的使用性能, 也在很大程度上缩短了其使用寿命, 并带来了巨大的经济损失。大量已有研究表明<sup>[1, 2]</sup>, 水损害是造成沥青混凝土路面早期破坏的主要肇因之一。由于沥青混凝土路面是层状结构, 层间结合处容易出现空隙, 一旦排水不畅则形成滞水区, 在行车荷载作用下将产生高孔隙水压和高速水流, 进而致使沥青与集料过早剥离而诱发水损害。其后, 水损害由沥青混凝土面层底部逐渐向上扩展, 最终导致整个沥青混凝土面层的破坏。为了更好地解释这种现象, 本文通过建立水损害有限元模型来计算沥青混凝土路面层间孔隙水压力, 以对水损害的力学机理进行尝试性探究。

## 1 力学模型的提出及基本假设<sup>[3, 4]</sup>

### 1.1 宏观力学模型

将沥青混凝土路面视为在单圆垂直均布荷载作用下的均质、各向同性、层间完全连续接触的线弹性层状轴对称体系, 对宏观力学模型采用 8 节点等参单元进行离散, 如图 1 所示。图 1 中:  $O$  为原点;  $Z$  为对称轴;  $R$  为径向轴;  $h_n$ 、 $E_n$  和  $\mu_n$  为结构层的厚度、模量和泊松比;  $\delta$  为轴对称均布荷载  $p$  的作用半径。设路面结构内没有初始应力和初始应变。由于对称性, 仅取路面结构体系的一半进行分析。模型的边界条

件: 在  $Z$  轴上 ( $r=0$ ) 及右部边界上, 仅产生竖向位移而无径向位移; 路表除均布荷载外为自由边界; 在底部边界上, 认为距路表足够深处, 其竖向和径向位移均为 0, 即作为固定边界处理。

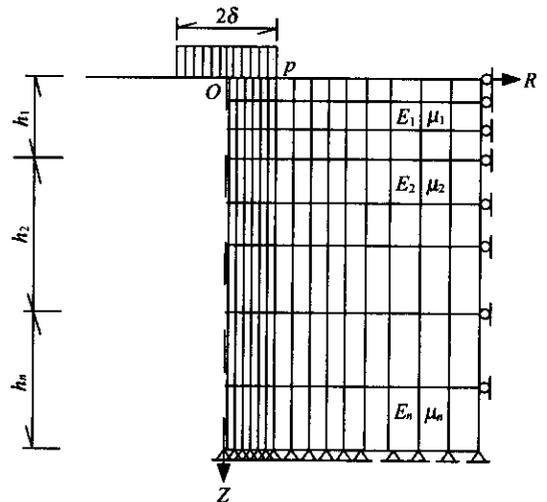


图 1 宏观分析有限元模型

宏观力学模型用于计算沥青混凝土路面结构的位移场、应力场, 以得到各单元的变形与受力状态, 从而为微观分析提供基础。在宏观分析中不区分混合料骨架与层间孔隙水, 而视为一个整体来考虑。

### 1.2 微观力学模型

仅取荷载中心下对称轴上的微元进行不同层位的层间孔隙水压力分析, 此时矩形单元退化为圆柱体单元。在微观分析中做如下基本假设:

(1) 微观力学模型为中心含水球的单孔圆柱体微元,微元在层间界面上下部分的材料参数取各自所在路面结构层的模量与泊松比;

(2) 在瞬时荷载作用下,水来不及排出孔隙,即仅考虑孔隙水封闭的情况,不考虑孔隙水的冲刷及孔隙水压力的消散过程,同时不计沥青混凝土自重的影响,只考虑车辆荷载作用产生的水压力;

(3) 微元中的孔隙水是不可压缩的,即只有变形,而无体积变化。

由于宏观力学模型的位移场、应力场是轴对称的,所以在上述假设前提下微观力学模型仍是轴对称模型。微观模型采用8节点等参单元进行离散,如图2所示。

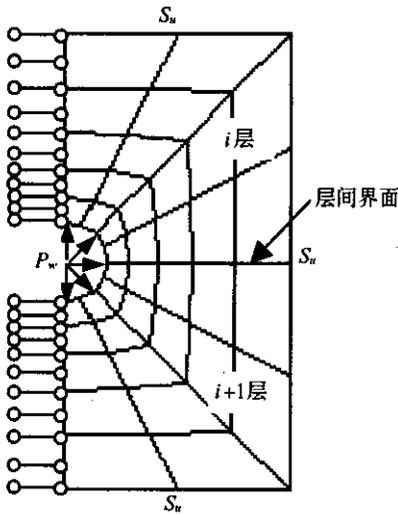


图2 微观分析有限元模型

微元坐标系以孔隙球心为原点,坐标向左向下为正。由于对称性,仅取模型的1/2进行分析。模型边界条件:在对称轴上,孔隙圆弧边界上是均布的孔隙水压力  $P_w$ ,这是求解目标;非孔隙圆弧边界为滑动约束;其余边界为已知位移边界  $S_u$ ,由宏观分析取得。

2 程序计算求解的实现<sup>[4]</sup>

假设微元细化后总节点数为  $n$ ,则有  $2n$  个方程,但是由于孔隙水压力未知,所以未知数有  $2n+1$  个,要进行求解必须再补充1个方程。根据前述微元模型中的假设——封闭孔隙水不可压缩,则对孔隙有:

$$V_{\text{变形后}} = V_{\text{变形前}} \quad (1)$$

这样就有  $2n+1$  个方程,可以求解  $2n+1$  个未知数。

2.1 微元变形前孔隙的体积

假设微元中的层间孔隙半径为  $r$ ,则孔隙变形前的体积为:

$$V_{\text{变形前}} = 4 \times \pi \times r^3 / 3 \quad (2)$$

2.2 微元变形后孔隙的体积

孔隙变形后的体积根据孔隙周边节点的位移求解。下面来分析一下孔隙变形后的体积计算。

由于微元是轴对称模型,故变形后仍是轴对称的。假设孔隙周边上有相邻2个节点  $A(r_i, z_i)$ 、 $B(r_{i+1}, z_{i+1})$ ,在外力作用下,它们的位移分别为  $(u_i, w_i)$  及  $(u_{i+1}, w_{i+1})$ ,那么这2个点在水球变形后的坐标为  $(r_i + u_i, z_i + w_i)$  与  $(r_{i+1} + u_{i+1}, z_{i+1} + w_{i+1})$ 。计算时,首先根据孔隙周边的节点划分将水球的某一轴对称剖面(1/2)分成若干三角形块(如图3中的  $OAB$ ,三角形的块数为  $KNA$ )。当网格划分足够密时,弧可近似视为直线。

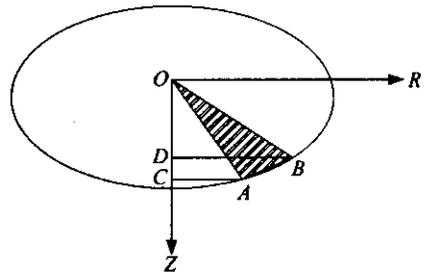


图3 孔隙变形后体积计算示意

其次,计算三角形块旋转1周后得到的旋转体体积,按式(3)计算。

$$V_i = V_{\text{DOB}} + V_{\text{ACBD}} - V_{\text{COA}} \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{DOB}}$ 、 $V_{\text{COA}}$ 、 $V_{\text{ACBD}}$  分别为三角形  $DOB$  与  $COA$  及梯形  $ACBD$  旋转1周后所得旋转体的体积。

根据定义,  $V_{\text{DOB}}$ 、 $V_{\text{COA}}$  和  $V_{\text{ACBD}}$  的计算式分别为:

$$V_{\text{DOB}} = \pi \times (z_{i+1} + w_{i+1}) \times (r_{i+1} + u_{i+1})^2 / 3$$

$$V_{\text{COA}} = \pi \times (z_i + w_i) \times (r_i + u_i)^2 / 3$$

$$V_{\text{ACBD}} = \pi \times \left[ \left[ (r_{i+1} + u_{i+1})^2 - (r_i + u_i)^2 \right] \times [(z_{i+1} + w_{i+1}) - (z_i + w_i)] / 3 \right]$$

最后将各部分体积相加减得到孔隙变形后的体积:

$$V_{\text{变形后}} = \sum_{i=1}^{KNA} V_i \quad (4)$$

2.3 收敛标准

就数值计算而言,要绝对满足式(1)是不可能的,这就涉及到一个收敛标准问题。本文计算程序采用如下收敛指标:

$$f = (V_{\text{变形后}} - V_{\text{变形前}}) / V_{\text{变形前}} \quad (5)$$

在计算时,反复调整孔隙水压力的大小直至  $|f| \leq 1.0 \times 10^{-6}$ ,此时视为满足式(1),孔隙水压力计算精度可控制在 0.1 kPa。如果  $f < 0$ ,则表示要增大孔隙水压力,反之则要减小孔隙水压力。至于调整的幅度,视  $|f|$  的大小决定。

### 3 孔隙水压力计算及其结果分析

#### 3.1 计算条件

在宏观分析中采用临长高速公路沥青混凝土路面的典型结构,如表 1 所列。

表 1 沥青混凝土路面结构及参数

层位	材料	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比
1	中粒式 沥青混凝土	0.05	1 400	0.25
2	中粒式 沥青混凝土	0.06	1 200	0.25
3	粗粒式 沥青混凝土	0.07	1 000	0.25
4	5%~6%水泥 稳定碎石	0.20	1 400	0.25
5	5%~6%水泥 稳定碎石	0.20	1 200	0.25
6	4%水泥 稳定碎石	0.20	1 000	0.25
7	土基	15.0	32	0.35

注:行车方向约取 13 m,材料参数均取自《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97)。

分析中采用的单圆垂直均布荷载如表 2 所列,荷载半径取 0.15 m。在微观分析中,微元大小为:底面半径为 10 mm,高为 20 mm,所取微元的位置如表 3 所列。

表 2 轮胎接地压力及其相应的轴重

轮胎接地 压力 $p$ /MPa	0.7	0.8	0.9	1.0	1.26
轴重/kN	100	114	128	142	180

表 3 微元中心深度 cm

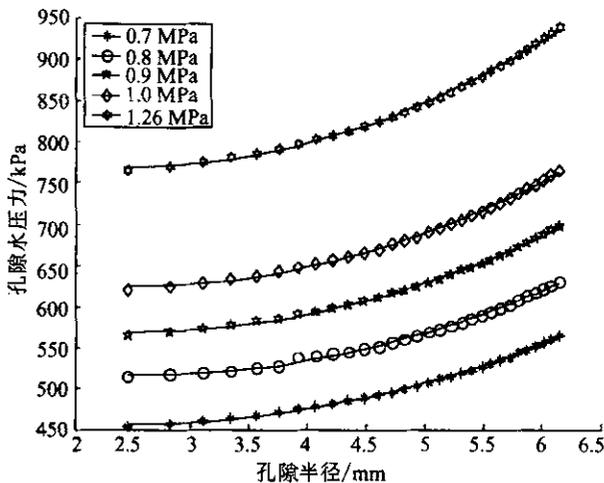
微元 1(1~2 之间)	微元 2(2~3 之间)	微元 3(3~4 之间)
5.0	11.0	18.0

#### 3.2 计算结果

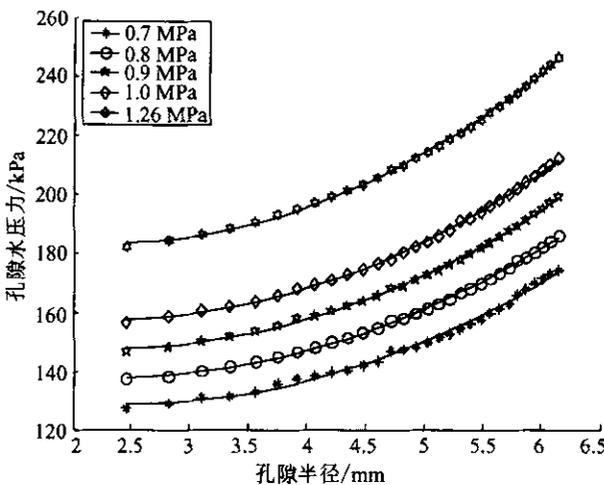
计算结果如图 4、图 5 所示。

#### 3.3 数据拟合

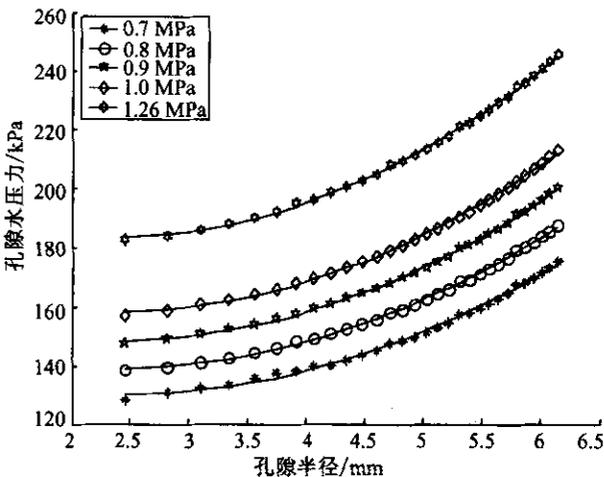
对计算结果进行拟合,拟合线如图 4 中实线所示。



(1) 上面层与中面层之间



(2) 中面层与下面层之间



(3) 下面层与基层之间

图 4 层间孔隙水压力的变化规律

(1) 上面层与中面层之间的孔隙水压力:

$$P_r = 0.608p + 4.375 \times 10^{-3} r_{\text{pore}}^2 - 0.029 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.995$$

式中:  $P_r$  为单圆均布荷载作用瞬间的孔隙水压

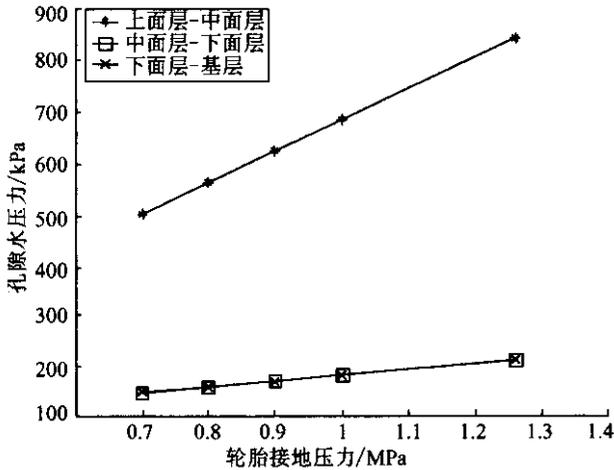


图5 层间孔隙水压力随轮压的变化( $r_{pore}=5\text{ mm}$ )

力,MPa; $p$ 为轮胎接地压力,MPa; $r_{pore}$ 为孔隙半径,mm; $R$ 为相关系数。

(2)中面层与下面层之间孔隙水压力:

$$P_r = 0.114p + 1.730 \times 10^{-3} r_{pore}^2 + 0.028 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.990$$

(3)下面层与半刚性基层之间的孔隙水压力:

$$P_r = 0.110p + 1.730 \times 10^{-3} r_{pore}^2 + 0.0325 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.990$$

### 3.4 结果分析

由图4和图5可知:(1)在某级荷载作用下,层间孔隙水压力随孔隙半径的增大而近似呈二次曲线增长;(2)对一给定的孔隙半径,层间孔隙水压力随荷载的增大而近似呈线性增长,尤其是上面层与中面层之间的孔隙水压力受荷载影响显著;(3)中面层与下面层、下面层与半刚性基层之间的孔隙水压力水平相当,较上面层与中面层之间的孔隙水压力小得多;(4)在标准轴载作用下,层间孔隙水压力

一般在100~500 kPa范围内变化,远大于沥青与集料之间的粘附力,如此大的孔隙水压力一旦释放,形成的高速水流将造成层间的严重冲蚀,进而导致沥青与集料过早剥离而诱发水损害。

### 4 结语

本文通过建立沥青混凝土路面孔隙水压力计算模型,将路面结构宏观受力分析与微观受力分析相结合,探讨了沥青混凝土路面层间孔隙水压力的变化规律。基于孔隙水压力的计算结果,可以得出如下主要结论:

(1)轮载引起的孔隙水压力将造成路面层间的严重冲蚀,导致沥青与集料过早剥离而诱发水损害,并由层底逐渐向上扩展,最终致使整个沥青混凝土面层破坏;

(2)超载是造成层间高孔隙水压力的重要原因,将加速沥青混凝土路面的过早破坏。

由于篇幅限制,本文没有讨论结构组合、微元尺寸等对层间孔隙水压力的影响。同时,由于缺乏孔隙水压力实测数据,本文中的相关数据及结论有待进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 罗志刚,等. 沥青路面水损害浅析与排水处治措施[J]. 湖南交通科技, 2002, 28(4).
- [2] 罗志刚,周志刚,郑健龙. 沥青路面水损害问题研究现状[J]. 长沙交通学院学报, 2003, 19(3).
- [3] 王勳成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [4] 罗志刚. 高等级沥青路面水损害分析[D]. 长沙:长沙理工大学, 2003.

## Calculation of Interbedded Pore Water Pressure of Asphalt Concrete Pavement

LUO Zhi-gang<sup>1</sup>, LING Jian-ming<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-gang<sup>2</sup>, ZHENG Jian-long<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Road Engineering Institute, Changsha Science and Technology University, Changsha 410076, China)

**Abstract:** To counter the moisture damage problem of asphalt concrete pavement, the axis-symmetric finite element method is applied to analyze variety of interbedded pore water pressure of asphalt concrete pavement under different load conditions. The study results show that pore water pressure erodes pavements, induces to strip the asphalt from aggregates so as to arouse moisture damage of asphalt concrete pavement, and overload accelerates this course.

**Key words:** asphalt concrete pavement; pore water pressure; moisture damage; finite element method