

# 隧道内复合式路面沥青层混合料 剪应力设计方法研究

李英涛

(江苏省交通科学研究院 南京市 210017)

**摘要:**针对当前高速公路隧道复合式路面沥青层混合料设计方法存在的不足,根据隧道交通及复合式路面的受力特点,首次提出了隧道复合式路面沥青层混合料的剪应力设计方法,并结合实际工程提供了设计示例,供同行参考应用。

**关键词:**高速公路;隧道;复合式路面;沥青混合料;剪应力设计方法

在我国早期的公路建设中,由于建设资金严重短缺,在山区或半山区修筑公路多以盘山公路为主。这种公路不仅等级低,绕行里程长,而且能耗高,安全隐患多,对生态环境破坏大。近年来,公路隧道以其可提高线路标准、缩短运营里程、保护环境、不破坏森林植被等优点而越来越得到人们的青睐。据统计,至1979年,我国公路隧道通车里程仅为52 km,计374座。2000年我国隧道通车里程已达628 km,计1 684座,隧道平均长度达到373 m,公路隧道通车里程比1979年增长了12倍多。另外,据不完全统计,到2001年年底,我国建成长度为千米以上的公路隧道已有140余座。随着高等级公路向西部地区延伸,预计到2010年,我国将有总长155 km以上的公路隧道将要投入建设。

但是到目前为止,国内关于隧道工程的研究主要集中在隧道洞体的结构设计、施工技术以及隧道通风、照明等方面,关于隧道路面的研究,对隧道工程和道路工程来说都较少涉及,隧道内路面结构和材料设计也没有专门的规范和指南。《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)中虽对隧道路面的形式做了规定,但仍然比较粗略,关于隧道路面的结构和材料设计仍要套用公路或城市道路设计规范。另外,对于复合式路面而言,由于水泥混凝土板的强度要远高于沥青混凝土层,而且隧道路面承受的交通状况要比隧道外的路面恶劣,隧道中车辆制动频繁、渠化交通严重,所以复合式路面沥青层所承受的剪应力

要较隧道外的一般路面大,当沥青层所受到的剪应力大于混合料的抗剪强度时,沥青层就会出现推移、拥包等剪切破坏,所以有必要针对不同的车辆作用情况及复合式路面设计参数,提出一个抗剪指标供复合式路面沥青层混合料设计使用。

## 1 剪应力设计方法的可行性

### 1.1 原有沥青混凝土路面设计指标不可用

我国高速公路沥青混凝土路面的设计指标主要有两个——路面顶面的弯沉、沥青层底面的拉应力。隧道中虽然车辆荷载的作用条件要较隧道外苛刻,但是由于隧道围岩的强度较高,且复合式路面的强度也较高,使得路面顶面的弯沉指标和沥青层底面的拉应力指标都不可用,其原因见图1。

有限元计算的结果总结如图1。图1(a)为隧道内复合式路面AC层底面拉应力随面层厚度变化规律,由曲线位置可知其底面均受压,则底面的拉应力验算指标在隧道复合式路面设计中不可用;图1(b)为隧道内复合式路面AC层顶面弯沉随面层厚度的变化规律,由图中数据可见,复合式路面顶面的弯沉值很小,这主要是因为隧道复合式路面的基层及路基强度都很高,从而使得路面结构的整体强度较高,这样设计弯沉指标也不可用。

### 1.2 隧道复合式路面沥青层承受较大的剪应力

对于复合式路面,由于沥青层与水泥混凝土层之间模量的巨大差异,加之隧道中特殊的交通条件,

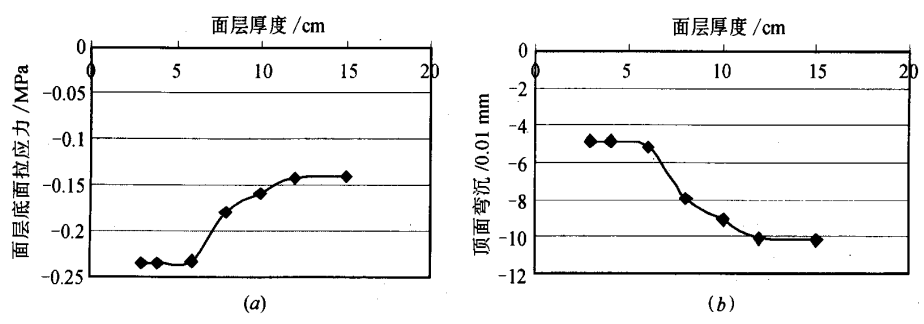


图 1 隧道内复合式路面面层受力、变形与面层厚度的关系

使得隧道复合式路面沥青层内的剪应力值要较隧道外大得多,这点可参见图 2。图 2 中给出了不同轴载作用下隧道内的复合式路面结构与隧道外的半刚性基层沥青混凝土路面和复合式路面的沥青层内所受最大剪应力的情况。图 2 中曲线 1 为隧道复合式路面在复合荷载作用下沥青层所受的最大剪应力;曲线 2 和曲线 3 分别为隧道外常用复合式路面(级配碎石底基层)和半刚性基层沥青混凝土路面,在车辆竖向荷载作用下沥青层所受的最大剪应力;曲线 4 为隧道外常用复合式路面结构在复合荷载作用下沥青层所受的最大剪应力,用于比较隧道基层的影响。

由图 2 数据可见,由于隧道高强的基层及车辆水平荷载的作用,使得隧道内复合式路面沥青层内所受的最大剪应力远大于隧道外路面。另外,比较曲线 1 和曲线 4 可见,由于隧道内高强的基层,即使在同样的车辆荷载作用下,隧道内复合式路面沥青层

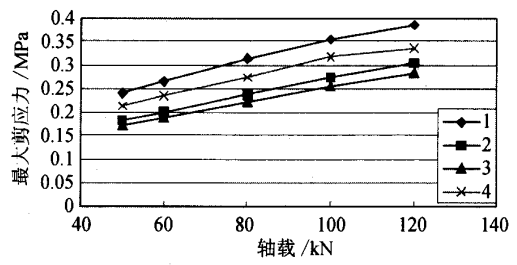


图 2 隧道内外沥青混凝土路面层内最大剪应力比较

所受的最大剪应力也较隧道外大。所以,在隧道复合式路面的沥青层设计中引入抗剪指标是有实际意义的。

图 3 中隧道路面是在旧的水泥混凝土路面上加铺一层沥青层形成的复合式路面。由于沥青混合料抗剪强度存在问题,使得沥青面层在车辆荷载的加速和制动过程中被拉裂,形成横向裂缝。

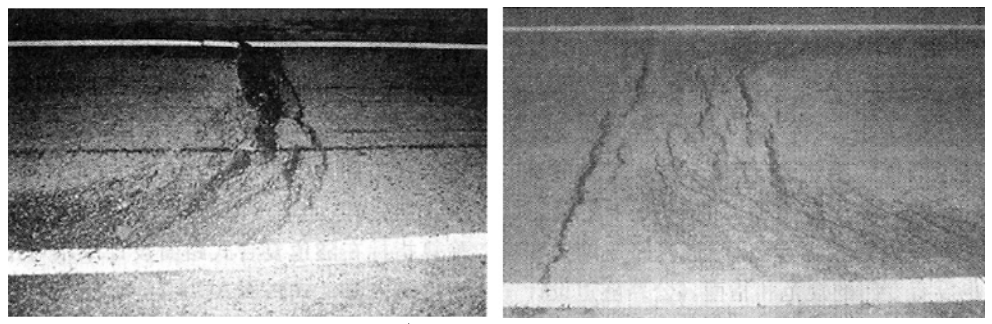


图 3 隧道复合式路面的表面裂纹

### 1.3 隧道复合式路面沥青层混合料引入抗剪指标具有一定基础

关于在沥青混凝土路面设计和沥青混合料组成设计中引入抗剪指标这个问题,早在 1982 年交通部《公路柔性路面抗弯拉、抗剪切指标的研究》,以及 1986 年建设部《城市道路柔性路面设计方法与指标

的研究》的成果中已经解决,并列入中华人民共和国行业标准《城市道路设计规范》(GJT 37—90)。当时由于高速公路尚未发展,渠化交通不明显,所以在公路规范中未予编进。应当说,此项工作在 20 世纪 80 年代已经基本完成。因此,在隧道沥青混凝土路面设计中引入抗剪指标,只是如何继承、发展、完善和创

新的问题,使其更能体现隧道的特色,符合隧道的实际,而无需从头做起。

#### 1.4 抗剪指标可较清晰地对沥青混凝土分类

同济大学的部分学者按贯入法进行了一批不同沥青、不同混合料组成的60℃抗剪强度试验,基本情况是:当集料组成合理时,采用70号重交沥青的抗剪强度 $\tau_d$ 在0.4~0.5 MPa间,而采用改性沥青的 $\tau_d$ 在0.6~0.8 MPa间。40℃较60℃时, $\tau_d$ 可提高2~3倍。如集料质量不合格,例如针片状含量太大,或组成不合理, $\tau_d$ 值可低于0.3 MPa以下。虽然资料还不系统,但已可见此法所得结果能反映出沥青混合料性能的差别。实际使用时以实测结果为准。

所以,在隧道的复合式路面沥青层设计中引入抗剪指标是必要且可行的。但城市道路的抗剪指标设计仅适用于柔性基层沥青混凝土路面和半刚性基层沥青混凝土路面,对于复合式路面并不适用,所以需要针对隧道内环境、基层支撑及车辆荷载的实际情况,确立隧道复合式路面沥青层的设计方法。

#### 2 以抗剪指标进行隧道沥青混合料设计的流程

本文中所提出的混合料设计流程只适合于复合式路面的沥青上面层,因为复合式路面沥青层内的最大剪应力通常发生在距表面1~4 cm的厚度内,而无论对于单沥青层还是双沥青层,此厚度都为上沥青层的范围,所以只需对沥青上面层进行特别设计。对于沥青中面层(或下面层)混合料,可按照一般沥青混凝土路面进行设计。

在图4所示的设计过程之所以采用界限轴载,而不是标准轴载,是因为当前公路运输超载现象严重,简单地以标准轴载进行材料设计无法满足当前的重交通要求。同济大学部分学者曾对超载车辆作用下高速公路的沥青混凝土路面抗剪强度进行过研究,以标准轴载为准,当超载率达到60%时要求面层材料的抗剪强度达到0.8 MPa,此时需采用PG76-28等级的沥青才能满足抗剪要求。而当前超重如此严重,可能重车作用一次就会导致面层剪切破坏,所以在此设计中引入界限轴载,即此隧道路面准许通过的最大轴载值,通过限制轴载来保证路面结构的设计寿命。

图4中的抗剪强度结构系数 $K$ ,依据城市道路设计规范,当车辆缓慢制动时,摩擦系数 $f$ 在0.2左右, $K=0.33N^{0.15}$ ;当偶然的紧急制动时,摩擦系数 $f$ 可达到0.5,此时 $K$ 取1.2。

当前由于还没有对沥青混合料进行精确的抗剪强度分级,所以实际工程沥青混合料设计时可从图4中第4框内容做起,检验所选择混合料的抗剪强度能否满足实际工程的需要。

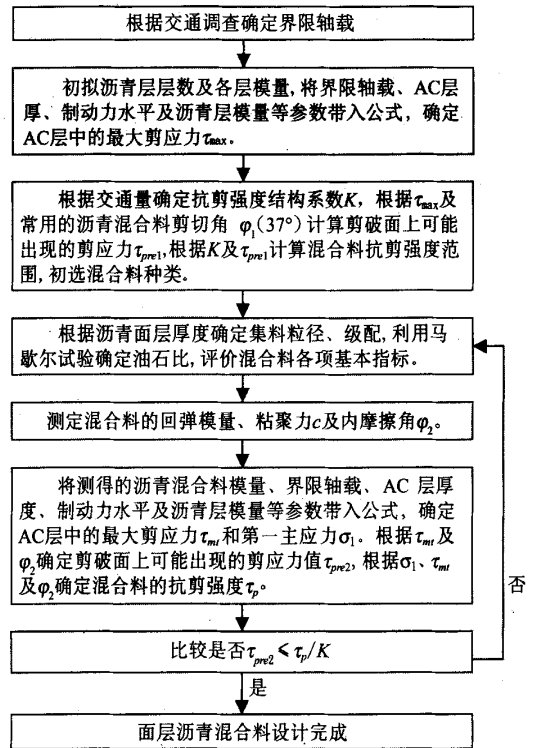


图4 隧道复合式路面沥青混合料设计流程

#### 3 隧道内复合式路面沥青层最大剪应力公式回归

为了便于实际工程的应用,本文对影响隧道内复合式路面沥青层最大剪应力的几个因素,利用统计软件SPSS进行了回归,得到了复合式路面沥青层最大剪应力与车辆竖向荷载、水平荷载、沥青层厚度、沥青层模量等几个因素的关系,其表达式如下:

$$\tau_{\max} = \frac{(\sigma_v^{0.903\ 155} + \sigma_h^{0.877\ 76}) h^{0.037\ 566}}{E_1^{0.146\ 267\ 6} E_2^{0.005\ 389} E_3^{-0.000\ 463}} \quad (R^2 = 0.856\ 1) \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_v^{0.775\ 287} \sigma_h^{0.211\ 28} h^{0.054\ 44}}{E_1^{-0.049\ 258} E_2^{0.014\ 583} E_3^{0.135\ 08}} \quad (R^2 = 0.933\ 3) \quad (2)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为复合式路面沥青层内最大剪应力,MPa; $\sigma_1$ 为最大剪应力点的第一主应力值,MPa; $\sigma_v$ 为车辆荷载竖向作用力,MPa; $\sigma_h$ 为车辆荷载水平作用力,一般情况取0.15~0.2 $\sigma_v$ ,车辆水平作用较严重时可根据实际情况取值,MPa; $h$ 为复合式路面

沥青层厚度, cm;  $E_1$  为复合式路面沥青上面层模量, MPa;  $E_2$  为复合式路面沥青中面层模量, 如复合式路面中未设该层, 则此值取为 1.0, MPa;  $E_3$  为复合式路面沥青混凝土下面层模量, 如复合式路面中未设该层, 则此值取为 1.0, MPa;

以往, 在进行路面结构的力学分析时, 只考虑车辆荷载的竖向作用, 使得计算得到的路面结构内的受力情况与实际存在较大的偏差, 部分路面甚至由于受拉、剪应力作用较大而出现早期破坏。为了模拟隧道中车辆较频繁的制动、加速过程产生的水平力对隧道路面的作用, 本文在对隧道内复合式路面进行有限元力学计算时考虑了水平荷载的作用。为了模拟制动、加速过程产生的水平力, 本文考虑了 5 种水平荷载, 从 0.15 MPa 到 0.35 MPa 基本覆盖了当前路面中可能产生的水平力, 并对不同的竖向荷载和水平荷载进行了组合, 得到共 25 种荷载组合。为了模拟复合式路面沥青层厚度在不同荷载组合时产生的最大剪应力, 本文针对当前隧道中常用的沥青混凝土路面厚度, 共选取了 6 种沥青层厚度 (3 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、12 cm), 基本覆盖了隧道中常用的沥青层厚度。而且, 对几种沥青层模量进行了计算。所以, 本文的计算数据比较充分, 计算结果具有一定的覆盖面, 回归公式 (1) 和公式 (2) 具有相当的可信度, 可用于隧道中复合式路面沥青层最大剪应力的计算, 并为沥青层材料的选择提供指标参考。

#### 4 隧道复合式路面沥青层混合料设计示例

根据隧道复合式路面沥青层混合料的设计流程, 隧道复合式路面沥青层混合料设计示例如下。

##### (1) 设计基本参数。

某隧道拟采用连续配筋混凝土+沥青混凝土复合式路面结构, 沥青混凝土层厚度为 10.5 cm, 分两层, 上层为 4.5 cm, 下层为 6 cm。

界限轴载为 100 kN, 竖向荷载为 0.573 MPa, 水平荷载为 0.12 MPa, 隧道路面寿命期内累计标准轴载作用次数为  $6.6 \times 10^6$  次。根据隧道的服务水平及交通组成, 隧道路面设计年限内水平荷载作用次数按标准轴载作用次数的 10% 计, 则  $N = 6.6 \times 10^5$  次。

初拟沥青混凝土上面层模量为 1 400 MPa, 沥青混凝土下面层模量为 1 200 MPa。

##### (2) 沥青层最大剪应力预测值。

将以上数据带入式 (1), 可求得隧道复合式路面沥青层内的最大剪应力预测值为:

$$\tau_{\max} = \frac{(0.573^{0.903\ 155} + 0.12^{0.877\ 76}) \times 10.5^{0.037\ 566}}{1\ 400^{0.146\ 267\ 6} \times 1\ 200^{0.005\ 389} \times 1} = 0.277\ \text{MPa}$$

剪破面上可能出现的剪应力值为:

$$\tau_{pre1} = \tau_{\max} \times \cos \varphi_1 = 0.277 \times \cos 37^\circ = 0.221\ 2\ \text{MPa}$$

(3) 沥青混合料的选择及其回弹模量、抗剪强度的确定。

根据式  $K = 0.33N^{0.15}$  计算抗剪强度结构系数, 其中  $N = 6.6 \times 10^5$  次, 则  $K = 2.463$ 。所选混合料抗剪强度应不小于  $K\tau_{pre1} = 0.221\ 2 \times 2.463 = 0.544\ 7\ \text{MPa}$ 。

隧道沥青混凝土路面初选的混合料为: 上面层 4.5 cm SBS 改性沥青玛蹄脂混合料+下面层 6 cm AC-20S 沥青混合料。由室内试验得, 上面层、下面层在 40℃ 时的弹性模量分别为 1 700 MPa 和 1 200 MPa, 上面层沥青混合料的粘聚力及内摩擦角分别为 0.41 MPa、39°。

(4) 沥青混凝土层内最大剪应力及第一主应力计算值。

$$\tau_{mt} = \frac{(0.573^{0.903\ 155} + 0.12^{0.877\ 76}) \times 10.5^{0.037\ 566}}{1\ 700^{0.146\ 267\ 6} \times 1\ 200^{0.005\ 389} \times 1} = 0.269\ 3\ \text{MPa}$$

$$\sigma_1 = \frac{0.573^{0.775\ 287} \times 0.12^{0.211\ 28} \times 10.5^{0.054\ 44}}{1\ 700^{-0.049\ 258} \times 1\ 200^{0.014\ 583} \times 1} = 0.613\ 4\ \text{MPa}$$

剪破面上可能出现的剪应力值为:

$$\tau_{pre2} = \tau_{mt} \times \cos \varphi_2 = 0.269\ 3 \times \cos 39^\circ = 0.209\ 3\ \text{MPa}$$

面层沥青混合料的抗剪强度值为:

$$\tau_p = c + [\sigma_1 - \tau_{mt}(1 + \sin \varphi_2)] \tan \varphi_2 = 0.41 + [0.613\ 4 - 0.269\ 3 \times (1 + \sin 39^\circ)] \times \tan 39^\circ = 0.541\ 4\ \text{MPa}$$

(5) 设计合理性判别。

根据图 4 所示程序, 要判别  $\tau_{pre2}$  与  $\frac{\tau_p}{K}$  的关系。

在缓慢制动时, 抗剪参数  $K = 2.463$ ,  $\tau_{pre2} = 0.209\ 3\ \text{MPa}$ 。由于:

$$\frac{\tau_p}{K} = \frac{0.541\ 4}{2.463} = 0.219\ 8\ \text{MPa}$$

则有  $\tau_{pre2} < \frac{\tau_p}{K}$ , 因而所选面层沥青混合料满足设计要求。

(6) 紧急制动判定。

紧急制动时, 抗剪参数  $K = 1.2$ , 水平力系数  $f = 0.5$ , 将  $\sigma_v = 0.573\ \text{MPa}$  和  $\sigma_h = 0.286\ 5\ \text{MPa}$  代

入式(1)和式(2),重复上述步骤的第四步和第五步,其计算结果如下:

$$\tau_{mt} = \frac{(0.573^{0.903\,155} + 0.286\,5^{0.877\,76}) \times 10.5^{0.037\,566}}{1\,700^{0.146\,267\,6} \times 1\,200^{0.005\,389} \times 1}$$

$$= 0.332\,4\text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = \frac{0.573^{0.775\,287} \times 0.286\,5^{0.211\,28} \times 10.5^{0.054\,44}}{1\,700^{-0.049\,258} \times 1\,200^{0.014\,583} \times 1}$$

$$= 0.737\,2\text{ MPa}$$

剪破面上可能出现的剪应力值为:

$$\tau_{pre2} = \tau_{mt} \times \cos\varphi_2 = 0.332\,4 \times \cos 39^\circ$$

$$= 0.258\,3\text{ MPa}$$

面层沥青混合料的抗剪强度值为:

$$\tau_p = c + [\sigma_1 - \tau_{mt}(1 + \sin\varphi_2)] \tan\varphi_2$$

$$= 0.41 + [0.737\,2 - 0.332\,4 \times (1 + \sin 39^\circ)] \times \tan 39^\circ = 0.568\,4\text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_p}{K} = \frac{0.568\,4}{1.2} = 0.473\,7\text{ MPa}$$

$$\text{则有 } \tau_{pre2} = 0.258\,3\text{ MPa} < \frac{\tau_p}{K} = 0.473\,7\text{ MPa},$$

因此所选面层沥青混合料满足设计要求。

## 5 结语

针对当前高速公路隧道复合式路面沥青层混合料设计无合理指标的现状,文中首次提出了沥青混合料的剪应力设计方法,并给出了具体的设计过程及设计示例,供同行借鉴参考。

## 参考文献:

- [1] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [2] 邓学钧,黄晓明.路面设计原理与方法[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 林绣贤.关于沥青混凝土路面设计中抗剪指标的建议[J].公路,2004,(12).
- [4] JTJ 014—97,公路沥青路面设计规范[S].
- [5] GJT 37—90,城市道路设计规范[S].

# Research on Shear Stress Design Method for Composite Pavement Asphalt Course Mixture in Highway Tunnel

LI Ying-tao

(Jiangsu Provincial Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** In allusion to the shortages of the design method of the composite pavement asphalt course mixture in highway tunnel, according to the characteristics of the tunnel traffic and the tunnel pavement structure stress, the shear stress design method for composite pavement asphalt course mixture in highway tunnel is presented, and then the design examples are given with the practical engineerings, which could be the reference for others designers.

**Key words:** expressway; tunnel; composite pavement; asphalt mixture; shear stress design method