

文章编号: 0451-0712(2004)12-0066-04

中图分类号: U416. 217. 02

文献标识码: A

关于沥青混凝土路面设计中 抗剪指标的建议

林绣贤

(同济大学 上海市 200092)

摘 要:就沥青路混凝土面最大剪应力的确定问题,建议按《城市道路设计规范》的电算程序或诺谟图计算,并经全面分析比较后提出了简化方法。对沥青混合料的抗剪强度支持以贯入法测定,并从理论上予以论证和简化,对测定的仪器设备、温度等也提出了建议。最后,对如何实际应用做了示例说明。

关键词:抗剪指标;最大剪应力;抗剪强度;贯入法

由于高速公路的发展,在渠化交通下,沥青混凝土路面的车辙问题,越来越引起国内外的重视。大家都认为应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。其实这个问题在1982年交通部《公路柔性路面抗弯拉、抗剪切指标的研究》,和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)^[1],当时由于高速公路尚未发展,渠化交通不明显,公路规范未予编进而已。应当说,此项工作在20世纪80年代已经基本完成。因此,今后的工作应是继承、发展、完善和创新,无需从头做起,但旷日持久,久拖不决。

1 路面最大剪应力系数

1.1 路面最大剪应力系数的电算程序与诺谟图简介

当年已按弹性层状体系理论,双圆荷载图式由[吴晋伟]、郭大智编制了电算程序,计算了在垂直力和不同水平力综合作用下的最大剪应力系数 $\bar{\tau}_m$ 及最大主应力系数 $\bar{\sigma}_1$,并按笔者提出的当量换算新法,由唐有君绘制成以三层体系为基础的诺谟图,供使用。这样既有电算程序又有诺谟图,十分方便。

关于水平力的大小,当年曾随车以仪器测定,在正常行驶和思想有准备的制动、启动时,水平力系数 f 不大,一般小于0.17,故设计时, f 以0.2计算。但在紧急制动、上坡和转弯时,水平力系数可高达0.5

左右,最大值接近于路面的摩擦系数。鉴于高温时路面摩擦系数较标准状态略低,故此时设计时, f 以0.5计。

为此,电算程序中水平力系数 $f=0.1\sim 0.5$ 。绘制诺谟图时,以 $f=0.3$ 为基础,并根据不同 f 时的电算结果,得式(1)、(2),供使用。

$$\bar{\tau}_{m-f} = \bar{\tau}_{m-0.3} + 1.3(f - 0.3)$$

(1)

$$\bar{\sigma}_{1-f} = \bar{\sigma}_{1-0.3} + 0.46(f - 0.3)$$

(2)

关于这方面研究过程详情,请参阅拙作《柔性路面结构设计方法》^[2]一书。

1.2 计算示例

为了便于理解,兹按高温状况(以60℃为例)和车辙有效温度状况(以40℃为例),按此法计算了面层 h/δ 为1.0和2.0时柔性基层和半刚性基层时的最大剪应力。水平力系数分别以0.5和0.2为例。经当量换算后各层结构及抗压模量见表1。

表1 示例计算的当量三层体系结构

基层类型	$h/\delta, H/\delta$	E/MPa	高温状况时 ($T=60^\circ\text{C}$)	有效温度时 ($T=40^\circ\text{C}$)
柔性基层	$h/\delta=1.0, 2.0$	E_1	300	600
	$H/\delta=3.0$	E_2	600	800
	土基	E_3	30	30
半刚性基层	$H/\delta=3.0$	E_1	300	600
	$H/\delta=3.0$	E_2	1 200	1 200
	土基	E_3	30	30

在标准轴载 $P=100\text{ kN}$ 、轮压 $p=0.7\text{ MPa}$ 时,最高设计温度和有效温度所对应的最大剪应力 τ_m 计算结果见表 2。

表 2 不同水平力系数 f 时的最大剪应力 τ_m MPa

水平力系数 f	h/δ	柔性基层 τ_m	半刚性基层 τ_m
0.5	1.0	0.521(0.474)	0.526(0.510)
	2.0	0.528(0.487)	0.532(0.514)
0.2	1.0	0.248(0.208)	0.255(0.246)
	2.0	0.257(0.218)	0.261(0.252)

注:表中括号内数字为有效温度时的最大剪应力。

从表 2 及大量计算比较后知,路面结构类型、厚度等对最大剪应力影响不大,关键决定于水平力系数。在 $f=0.5$ 时,高温和有效温度的 τ_m 分别在 $0.52\sim0.53\text{ MPa}$ 和 $0.47\sim0.51\text{ MPa}$ 之间; $f=0.2$ 时, τ_m 分别在 $0.25\sim0.26\text{ MPa}$ 和 $0.24\sim0.25\text{ MPa}$ 之间。可以简化为: $f=0.5$ 时,高温时的 $\tau_m=0.53\text{ MPa}$,有效温度时的 $\tau_m=0.51\text{ MPa}$; $f=0.2$ 时, τ_m 统一用 0.25 MPa 。

2 沥青混合料的抗剪强度测定方法

《城市道路设计规范》(GJT 37-90)是采用闭式三轴试验测定 c 和 φ 值,通过 $\tau=c+\sigma_a\tan\varphi$,求得抗剪强度 τ ,式中 σ_a 为破坏面上的法向应力。

$$\sigma_a = \sigma_1 - \tau_m(1 + \sin\varphi)$$

式中: σ_1 、 τ_m 分别为最大主应力和最大剪应力。

然后与路面可能产生的剪应力 $\tau_a=\tau_m \cdot \cos\varphi$ 相平衡。

孙立军教授等建议采用贯入试验,通过抗剪强度参数求得 τ_m 、 σ_1 和 σ_3 ,再辅以单轴试验,从摩尔圆求得 c 和 φ 值^[3],以取代三轴试验。

作者认为由于过去三轴试验只能求得 c 和 φ 值,而不能直接得到抗剪强度 τ_d ,只好按以上方法转化。如果贯入试验可以直接求得抗剪强度 τ_d ,那就可以与路面上产生的最大剪应力 τ_m 直接取得平衡,而无需再通过 c 和 φ 值转化了。

2.1 贯入试验测定抗剪强度的方法

根据作者的理解,孙教授的思路是以有限元法计算得当外荷载 $p=1\text{ MPa}$ 时,均匀体试件的最大剪应力 $\tau_m=0.339\text{ MPa}$,此时,如果该试件发生剪切损坏,即最大剪应力与抗剪强度平衡,则该试件的抗剪强度即为 0.339 MPa 。那么,不同沥青混合料试件的贯入强度 p 乘以 0.339 即为该材料的抗剪强度 τ_d ,并把

0.339 命名为“抗剪强度参数”。作者支持孙教授的思路,但因为是初次尝试,有些问题说得还不深透,因而有些同志提出质疑,对贯入试验得到的抗剪强度是否正确,心存疑虑。其实所有的贯入试验,都是抗剪强度的反映,例如土的液限测定,就是以剪应力与抗剪强度 1.9 kPa 相平衡而得到。为此,作者愿为贯入试验法测抗剪强度做进一步的论证。

2.2 贯入试验测抗剪强度的理论基础

在拙作《柔性路面结构设计方法》^[2]一书中,曾提及 CBR 设计法的由来与发展。1928 年~1929 年美国加州公路局进行道路破坏状况调查时,O. J. 波特等就是认为路面的损坏都与土基和路面各层材料压实度与抗剪强度不足有关,为了表示其强度的大小,开创了 CBR 试验法,以后连续进行了 10 多年的路面调查,提出了土基 CBR 法与路面厚度的关系,得出轮载 $P=41\text{ kN}$ 、轮压 $p=0.42\text{ MPa}$ 时的第一根关系曲线。以后,美国陆军工兵部队(USACE)认为,既然路面的损坏与土基抗剪强度不足有关,那么就可以第一根曲线为基础,利用布辛氏均匀体剪应力公式,计算不同路面厚度时土基的抗剪强度 τ_z ,得到与 CBR 值的关系,据此推算得其他轴载 P 及轮压 p 时的 CBR 设计曲线族。

可见 CBR 贯入试验,本来就是为了反映土基抗剪强度的一种方法,由于试件是均匀体,所以贯入试验是作为圆形均布荷载 p 下受力状况的表现形式。

根据布辛氏理论,在圆形均布荷载 p 下,轴载处半空间体的最大剪应力 τ_m 公式为:

$$\tau_m = \frac{p}{4} \left\{ (1 - 2\mu) + \frac{2(1 + \mu) \frac{z}{a}}{\left[1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right]^{3/2}} - \frac{(1 - 2\mu) \left(\frac{z}{a} \right)^3}{\left[1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} \tag{3}$$

τ_m 的极值位置为:

$$\frac{\partial \left(\frac{\tau_{\max}}{p} \right)}{\partial \left(\frac{z}{a} \right)} = 0$$

据此推导得:

$$\frac{z}{a} = \sqrt{\frac{2(1 + \mu)}{7 - 2\mu}} \tag{4}$$

式中: a 为荷载半径; μ 为泊桑比; z 为距路表的深度。

计算结果见表 3。

表 3 弹性半空间体最大剪应力系数 $\bar{\tau}_m$ 及位置

μ	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5
z/a	0.62	0.637	0.655	0.672	0.707
$\bar{\tau}_m = \tau_m / p$	0.363	0.348	0.321	0.310	0.289

据此,当贯入试验接近破坏时剪应力与抗剪强度平衡,所以贯入强度 p 乘以剪应力系数 $\bar{\tau}_m$ 即得该试件的抗剪强度,这显然是正确的。

孙教授等以有限元法计算得 $\mu=0.35$ 时,均匀体的“剪应力参数”(0.339)实质上即最大剪应力系数 $\bar{\tau}_m$,其结果与布辛氏理论计算的 0.321 基本相同,只是计算方法不同出现极值的位置有所差异。因此,孙教授把贯入试验移植于沥青混合料的抗剪强度测定方法应当是合理的。据悉,美国也在进行同样的工作,但作者尚未见其最终结论。

2.3 试件与压头尺寸以及试验温度与加压速度的建议

2.3.1 试件及压头尺寸的建议

孙教授等进行了不同试件直径 D 及压头直径 d 在 $p=0.7\text{ MPa}$ 时的最大剪应力 τ_m 计算,结果见表 4。

表 4 不同试件直径 D 及压头直径 d 的 τ_m (MPa) 和剪应力系数 $\bar{\tau}_m$

d/mm	d/D	$\phi 100\text{ mm}$ $\times 100\text{ mm}$	$\phi 100\text{ mm}$ $\times 63.5\text{ mm}$	$\phi 100\text{ mm}$ $\times 150\text{ mm}$
19	0.19	0.231(0.33)	0.226(0.323)	0.221(0.316)
28.5	0.285	0.237(0.339)	0.241(0.343)	0.233(0.333)
38	0.38	0.246(0.351)	0.248(0.354)	0.241(0.344)

注:表中括号内数字为最大剪应力系数 $\bar{\tau}_m$ 。

他们比较后选定 $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的试件,压头直径为 28.5 mm ,所以贯入强度 p 乘以 0.339 为该试件的抗剪强度 τ_m 。

从表 4 看,在 $d/D=0.19\sim 0.38$ 范围,相差不大,为了便于推广,作者建议可采用 $\phi 100\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$ 的马歇尔试件,压头直径用 28.5 mm 或 25.2 mm 。也可直接用 CBR 试验的试件 $\phi 150\text{ mm}$,压头直径为 50 mm ($d/D=0.33$)。

试件成型可用旋转压实仪,也可分别采用标准马歇尔仪和大型马歇尔仪制样。加载可用 CBR 仪或土工试验的强度仪或其他压力机。

这样所有设备都是现成的,任何单位都可以自行测定。

至于贯入强度与抗剪强度的关系,根据表 3 的计算结果和孙教授的结果,由于 μ 值估计有困难,一般都按 0.35 计算,综合考虑后,可简化为抗剪强度为贯入强度 p 的 1/3,即:

$$\tau_d = p/3 \tag{5}$$

2.3.2 试验温度的建议

(1)高温状况,试验温度按 Superpave 路面最高温度 T_{max} 控制,即:

$$T_{\text{max}} = (T_{\text{mair}} - 0.006\ 18L_{st}^2 + 0.228\ 9L_{st} + 42.2) \times 0.954\ 5 - 17.78 \tag{6}$$

式中: T_{max} 为当地连续 7 d 最高温度平均值加保证率; L_{st} 为当地的地理纬度。

对此,在《公路沥青路面设计规范》(JTG 014—2004)送审稿中,已提供有全国各地的有关资料,可使用。

(2)控制车辙的有效温度 T_{eff} ,也按 Superpave 公式计算。

$$T_{\text{eff}} = 30.8 - 0.12Z + 0.92MAAT \tag{7}$$

式中: $MAAT$ 为多年年平均气温加保证率; Z 以路表温度为准时, $Z=0$

2.3.3 加压速度的建议

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》有关沥青混合料力学试验的规定,统一用 50 mm/min 。

2.4 不同沥青混合料的初步试验结果

孙教授的研究生们按贯入法进行了一批不同沥青、不同混合料组成的 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 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 τ_d 在 $0.4\sim 0.5\text{ MPa}$ 间,而采用改性沥青的 τ_d 在 $0.6\sim 0.8\text{ MPa}$ 间。 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时较 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 时, τ_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, τ_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。

这些只是示例,应用时以实测结果为准。

3 抗剪指标和应用方法

3.1 抗剪指标

有了路面结构的最大剪应力 τ_m 和沥青混合料实测的抗剪强度 τ_d ,则路面的最大允许剪应力 τ_m 可从抗剪强度 τ_d 除以路面结构安全系数 K 而得,此即沥青混凝土路面设计的抗剪指标,如式(8):

$$\tau_m \leq \tau_d / K \tag{8}$$

3.2 应用方法

3.2.1 对坡道和弯道多的丘陵区高速公路

此时,最严重的考验是在高温季节,但每年只有 7~10 d,所以累计交通量不大,建议按《城市道路设计规范》(GJT 37-90)原规定,安全系数用 1.2,即:

$$\tau_m \leq \tau_d / 1.2 \tag{9}$$

式中: τ_d 为按式(6)计算的高温设计温度(例如 60℃)时测定的沥青混合料抗剪强度。

从表 2 知,如最大剪应力 τ_m 为 0.53 MPa,则高温时测定的 τ_d 至少应有 $0.53 \times 1.2 = 0.64$ MPa,这就需要采用改性沥青了。

为防止多年行车的车辙积累,测定温度按式(7)计算控制车辙的有效温度(例如 40℃),此时建议安全系数为 3。即:

$$\tau_m \leq \tau_d / 3 \tag{10}$$

从表 2 知,如最大剪应力为 0.5 MPa,则 τ_d 应大于 1.5 MPa。如 60℃时 τ_d 达到 0.64 MPa,40℃时 τ_d 一般可达到 1.5 MPa。

3.2.2 平原区高速公路

此时水平力系数 f 用 0.2,从表 2 知,最大剪应力只有 0.25 MPa 左右,安全系数用 3.0,要求抗剪强度为 0.75MPa。相应的有效温度约为 40℃,那是可以通过的。此时只有在高温时偶然情况的紧急制动,其 $f = 0.5$ 、 $\tau_m = 0.5$ MPa,由于紧急制动不会出现在同一个点,故安全系数取 1.1,这对于合理集料组成,并按当地气温选用 PG 等级的沥青混合料是可以达到的。

4 结语

(1)沥青混凝土路面的最大剪应力 τ_m 可按《城市

道路设计规范》(GJT 37-90)的电算程序或诺谟图计算。一般对坡道、弯道多的道路:高温时 $\tau_m = 0.53$ MPa ($\bar{\tau}_m = 0.757$);有效温度时 $\tau_m = 0.51$ MPa ($\bar{\tau}_m = 0.729$)。平原区道路, $\tau_m = 0.25$ MPa ($\bar{\tau}_m = 0.357$),只有高温偶然紧急制动时 $\tau_m = 0.5$ MPa ($\bar{\tau}_m = 0.714$)。

(2)沥青混合料的抗剪强度可用贯入法测定,其抗剪强度等于贯入强度的 1/3。

(3)抗剪强度测定时,最高设计温度按式(6)计算,车辙有效温度按式(7)计算,加压速度用 50 mm/min。

(4)抗剪指标公式如式(8),坡道弯道多的道路高温状态时, K 用 1.2,有效温度时 K 用 3.0;平原区道路有效温度时 K 用 3.0,偶然紧急制动时, K 用 1.1。

(5)沥青混凝土路面设计时应提出对沥青混凝土面层的抗剪强度要求,施工时沥青混合料的抗剪强度应达到设计要求。

(6)汽车超载时,如超载率为 $m\%$,路面最大剪应力会提高 $m\%$,相应的抗剪强度要求也得提高 $m\%$,此时多数沥青混合料的抗剪强度将达不到要求,因而会加速路面的损坏,危害极大,应依法限制。详见参考文献[4]。

参考文献:

[1] GJT 37-90,城市道路设计规范[S].
[2] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
[3] 毕玉峰. 沥青混合料抗剪试验方法及抗剪参数研究[D]. 同济大学,2004.
[4] 林绣贤. 论汽车超载对沥青路面的危害[J]. 上海公路,2004,(3).

Recommendations for Shear Resistant Criteria
in Asphalt Concrete Pavement Design

LIN Xiu-xian

(Tongji University Shanghai 200092, China)

Abstret: It is suggested that the maximum shear stress is calculated by “Specification for Design of Municipal Roads” and the simply method provided which is carefully verified and compared. The shear strength of asphalt concrete is measured by penetrate method which is verified and simplified by theory and suggestions of measuring equipments and temperature are proposed also. Finally, an example for application is presented.

Key words: shear resistant criteria; maximum shear stress; shear strength; penetrate method