

柔性路面弯沉和路基压应变指标分析

Analysis of deflection and compressive strain on the surface and the subgrade of flexible pavement

黄 卫 何 平
(东南大学交通学院, 南京, 210096)

文 摘 分析了路表弯沉和土基顶面压应变对路面控制设计的不完全一致性,建立了路表弯沉和土基顶面压应变的相关关系,在明确了设计弯沉和容许弯沉的概念后,利用路表弯沉和土基顶面压应变的相关关系式,并借鉴了AI法土基顶面容许压应变方程,推导了旨在体现对土基顶面压应变进行控制的设计弯沉指标。

关键词 柔性路面,弯沉,压应变,设计指标。

中图法分类号 TU 413.62

作者简介 黄 卫,1961年生,博士,现任东南大学交通学院院长,教授,博士生导师。主要从事高等级公路设计理论和方法、高速公路控制与管理方面的教学和研究。

Huang wei He ping

(Transportation College, Southeast University, Nanjing, 210096)

Abstract This paper analyzed incompatibility of surface deflection criteria and subgrade compressive strain criteria. The related expressions between surface deflection and subgrade compressive strain is formulated by regression method. The concepts of design deflection and permissive deflection are clarified. The design deflection index to control subgrade compressive strain is introduced based on the relationship between surface deflection and subgrade compressive strain and on the compressive strain equation of AI design method.

Key words flexible pavement, deflection, compressive strain, design index

1 土基压应变和弯沉对路面控制的分析

世界上许多组织的柔性路面设计方法都采用了土基顶面压应变指标,通过对土基顶面压应变的控制来达到控制车辙和土基破坏的目的。

容许弯沉曾经是我国1978年版柔性路面设计规范的唯一指标。在1986年版的设计规范中,路表容许弯沉仍是柔性路面设计的控制指标之一。《公路柔性路面设计规范》(JTJ014-86)条文说明中关于容许弯沉的定义为:“容许弯沉值系指路面在设计使用年限末期的最不利季节,在标准轴载作用下容许出现的最大回弹弯沉值。”^[1]

长期以来,我国公路工作者普遍认为,弯沉指标是一项不仅能够反映路面各结构层及土基的整体强度和刚度,而且与路面的使用状态存在一定的内在联系^[2]。在谈到为什么要用容许弯沉指标作为设计的控制指标时,文献[2]指出,路基路面综合容许沉值是为了防止路面发生沉陷、弹簧、网裂等综合强度不足破坏而采用的指标,不用国外一般使用的土基压应变为指标,是因土基压应变难以测定,而且路表面弯沉值包括了土基和各层路面材料的竖向位移在内,更为全面,且易于现场测定,便于检验。

应该予以说明,容许弯沉值在路面设计中的作用

并不象我们通常认为的那样,尽管它具有检测方便的优点,它存在的问题可以从以下两个方面理解。

(1)高等级公路,特别是半刚性基层的高等级公路路面设计中,现行规范规定的容许弯沉值已失去对路面结构的控制作用。希望通过调整容许弯沉的要求来控制路面结构也缺乏依据。对于半刚性基层上的沥青路面,沥青面层和半刚性基层都通过了弯拉应力或弯拉应变的疲劳强度设计,已没有必要再用弯沉指标来控制沥青面层和半刚性基层的设计。只要路基在使用过程中保持良好的工作状态,就能保证整个路面结构处于良好的工作状态。因此,在这种情况下用土基顶面压应变指标比容许弯沉对土基的控制更为直接,更为合理。

(2)容许弯沉标准和路基容许压应变标准的不完全一致性。路面的破坏通常取决于路面各结构层的临界应变或临界应力,用应力和应变进行控制设计,符合材料破坏准则。容许弯沉值不能与应变或应力指标同时成为设计标准。下面将通过两个路面结构的分析予以说明。设有一个路面结构(图1(a)),路面厚度为 h_s ,模量为 E_s ,土基模量为 E_0 ,双轮引起的弯沉为 d_0 (A点),土基顶面的垂直应变值为 ϵ_0 。另有一个路面结构

(图1(b)),具有相同的荷载,但土基模量为 $\frac{1}{2}E_0$,显然和第一个路面结构相比较,在相同的荷载作用下,该结构具有更大的弯沉和土基顶面的垂直压应变。就容许的荷载作用次数而言,第一种路面结构的容许作用次数 N_1 要大于第二种路面结构的容许作用数 N_2 ,第二种路面结构必须增加路面厚度。根据弯沉和应变与路面结构的关系^[3],关于弯沉 d 可以作如下推导:

$$d \approx \{l/[h_s(E_s/E_0)^{\frac{1}{3}}]\}/E_0 \quad (1)$$

第二种路面结构为了获得相同的弯沉,则厚度因子为 $2/(2)^{1/3} = 1.59$,即厚度应增加59%。再从应变角度分析可表示为

$$\epsilon \approx \{l/[h_s(E_s/E_0)^{\frac{1}{3}}]\}^2/E_0 \quad (2)$$

为了获得相同的土基顶面压应变,则厚度增长因子为 $2/(2^{1/3})^2$,即厚度要增加26%。

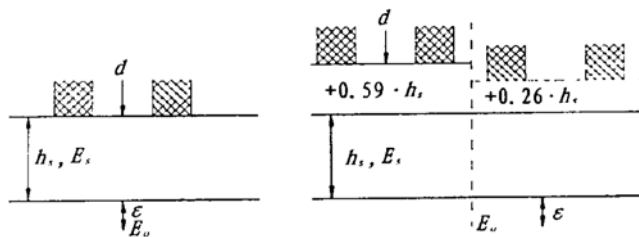


图1 路面弯沉和土基压应变的比较

Fig.1 Comparison between compaction strain of subgrade and deflection

由上述计算可以发现,由土基顶面压应变的控制和弯沉控制对路面结构的设计会导致相差很大的结果。因此,用弯沉来评定路面的结构状态时,应将其首先转换为应变或应力。最好的方法是实测弯沉盆,因为通过弯沉盆即可得到路面结构的应力或应变状态。

2 路表弯沉和土基顶面压应变的关系

根据分析,以土基顶面压应变作为设计准则,控制土基顶面的变形和破坏,控制路表车辙比路表弯沉准则更为合理,具有明确的含义,也更符合材料的破坏准则。

但是,路表弯沉设计准则在我国柔性路面设计中已使用多年,它具有量测方便的优点,在一定的程度上也反映了土基顶面压应变的关系,大量的计算分析表明,路表弯沉和路基顶面压应变之间具有良好的相关关系。通过相关关系可以由路表弯沉推算到土基顶面的压应变,把土基顶面压应变准则和路表弯沉结合起来,就可以同时利用土基顶面压应变准则较合理和路表弯沉量测方便的优点。图2是对三层路面常规参数范围内11475个路面结构路基顶面压应变和路表弯沉的计算结果。它们在双对数坐标上有规则地分布在一带状

范围内。两者的关系可以用如下形式的回归方程表示:

$$\epsilon_z = 0.04\omega^{1.64} \quad (3)$$

式中 弯沉的单位是 cm, ϵ_z 为土基顶面压应变。

分析表明,路表弯沉和土基顶面压应变之间的关系还要受到路面结构参数和材料参数(E_1, E_2, E_3, H_1, H_2)的影响,其影响比较复杂。为了建立路表弯沉和土基顶面压应变之间较准确的数学关系式,作者进行了大量的计算和详细的研究工作,得到了两者的相关关系式。公式如下:

$$\epsilon_z = e^b \quad (4)$$

$$b = [0.581x_1 + 0.283x_2 + x_3(0.75 - 0.078x_3) - x_4(0.153 - 0.331x_4) - 3.265]/E_1$$

其中 $x_1 = \ln(\omega E_1)$

$$x_2 = \ln(E_2/E_1(H_1/D)^{0.1} + (H_1/D)^{0.1}) \ln(E_3/E_1)$$

$$x_4 = \ln(H_1/D + H_2/D)$$

以上各式中 ω 为双圆荷载轮隙中间路表弯沉(cm); ϵ_z 为双圆荷载轮隙中心线上土基顶面压应变; E_1, E_2, E_3 为面层,基层和土基的模量; H_1, H_2 为面层和基层的厚度(cm)。

用公式(4)对大量的路面结构数据进行了计算比较,证明了这个公式具有很好的精度,公式解和弹性层状体系理论解的误差大多可控制在5%内。

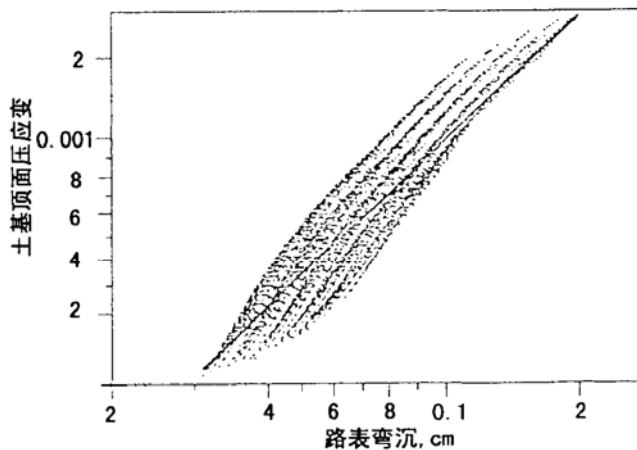


图2 路表弯沉和土基顶面压应变的关系

Fig.2 Relationship between compaction strain of subgrade and deflection on surface

3 容许弯沉和设计弯沉的分析

容许弯沉的定义在柔性路面设计规范条文说明及许多文献上都可以找到完全一致的定义。即路面容许回弹弯沉值,指路面在设计使用年限末的最不利季节,在标准轴载作用下,容许出现的最大回弹弯沉值。现行柔性路面设计规范指出,柔性路面设计采用容许

弯沉指标的目的,是为了控制路基路面结构的总变形,防止沉陷、车辙等整体强度不足造成的损坏。

设计弯沉是指路面建设竣工初期实测应该满足的弯沉值,或者称之为竣工验收应该满足的弯沉值。设计弯沉的实质就是路面设计的弯沉控制指标。现行柔性路面设计方法直接取容许弯沉作为设计弯沉。

在分析容许弯沉和设计弯沉时,要特别注意容许弯沉与其它设计指标,如容许弯拉应力、容许弯拉应变的区别。因为容许弯拉应力或容许弯拉应变是通过材料的常应力或常应变疲劳试验得到的。而容许弯沉值是对处于临界状态下的路面弯沉值与累计标准轴载次数推算得到的。路面使用期内,路面结构对于标轴准载的弯沉响应是变化的。

因此,容许弯沉 l_r 作为路面使用末期的临界弯沉是与初始设计弯沉 l_c 有区别的。路面设计弯沉应该与路面建成时所实测的初始弯沉相一致,在路面使用过程中,随着车辆作用次数 n 的增加,路面弯沉也将增加,当到达使用末期,即 $n = N$,路面弯沉 $l = l_r$,路面到达临界状态。

现行设计方法中直接选取了临界状态下的容许弯沉值作为路面的初始设计弯沉。实质上是混淆了初始设计弯沉和临界状态下容许弯沉的概念,降低了设计弯沉的要求,会造成路面设计的不安全。这一现象已经引起了一些科研和设计人员的重视,在高等级公路沥青路面设计中,通过各种措施,减小容许弯沉值。例如津京塘高速公路某段,设计年限累计轴数(次)为 $(15 \sim 20 \times 10^6)$,按规范的容许弯沉公式 $l_r = 0.94/N^{0.2}$ 计算得到的容许弯沉值为 $0.33 \sim 0.34$ 。设计时实际采用的容许弯沉值为 $0.28 \sim 0.30$,这相当于在规范容许弯沉值上乘了一个大约 0.86 的系数。

路面弯沉随着交通荷载作用次数的增加而增加,最终导致路面的破坏。这一现象已被路面现场测试资料 and 大型室内环道试验所证实。原苏联学者 B.K.阿佩斯京在其著作中指出,路表弯沉随累计交通量增加而增大,当路表面出现裂缝后,车辆荷载的继续作用导致了路面弯沉的迅速增大。重庆公路科学研究所室内环道重复试验结果证明,路面结构的动载弯沉随着荷载作用次数的增加而增大,强度降低,并且初始弯沉较大,强度较低的路面结构,其动载弯沉随荷载作用次数增加的速度较快,初期弯沉相对稳定期较短,路面一旦出现裂缝就很快发展成网裂而完全破坏。这一现象在东南大学的室内环道重复加载实验中得到证实^[4],也反映了同样的规律。

在明确了路面设计的初始弯沉和路面处于临界状态的容许弯沉的概念后。人们最关心的是对应于

容许弯沉值的初始设计弯沉应该如何取值,或者是初始设计弯沉与容许弯沉之间存在什么样的关系。前苏联学者 B.K.阿佩斯京的观点为

$$l_c = 0.56l_r$$

北京市公路路面管理系统的数据库记录有道路基层类型、路面类型、路面厚度、强度、交通量等级等资料,通过对路面强度随使用时间的变化规律的调查,得出路面强度在设计年限内衰减的系数,当按容许弯沉设计时,考虑强度衰减系数,即:

$$l_c = l_R/\alpha$$

式中 α 为路面强度补偿系数,与使用年限 y 的关系式如下:

$$\alpha = 1/(a - b \log y)$$

式中 a, b 值与面层厚度、基层类型、交通量有关,根据实测资料整理得到的 a, b 值列于表 1。

表 1 路面补偿系数 α 回归参数

Table 1 The pavement compensating coefficient of regression parameter

面层类型	基层类型	交通分级	a	b	R	S
薄层 ($\leq 3\text{cm}$)	碎(砾)石 基层	轻	1.05	0.45	0.97	0.036
		中	1.05	0.52	0.98	0.038
		重	1.05	0.54	0.98	0.041
		特重	1.05	0.67	0.99	0.039
薄层 ($\leq 3\text{cm}$)	半刚性 基层	轻中	1.04	0.34	0.97	0.031
		重特重	1.05	0.46	0.98	0.037
厚层 ($\leq 3\text{cm}$)	碎(砾)石 基层	轻中	1.04	0.31	0.63	0.028
		重特重	1.05	0.63	0.98	0.039

注: R 为相关系数; S 为均方差

假设路面使用年限为 10 年,交通量分级为重(2000~5000),于是对于薄层路面($h \leq 3\text{cm}$),基层类型分类为碎(砾)石基层和半刚性基层,强度补偿系数分别为

碎(砾)石基层

$$\alpha = 1/(a - b \log y) = 1/(1.05 - 0.54 \log(10)) = 1/0.51$$

则 $l_c = 0.51l_r$ (7)

半刚性基层

$$\alpha = 1/(1.05 - 0.46 \log(10)) = 1/0.59$$

则 $l_c = 0.51l_r$ (8)

设计弯沉和容许弯沉的关系实质上是反映了路面结构承载能力的衰减过程。影响因素是复杂的。上述几个关系式还只是利用有限的实测资料得到的。更为可靠和完善的公式尚需通过更加广泛深入的研究工作才能得到。

4 由土基容许压应变推算设计弯沉

上述各节内容已分别论述了土基顶面容许压应变和路表沉设计准则,土基顶面压应变和路表弯沉的关

系,容许弯沉和设计弯沉的概念。当结构层材料已进行了疲劳强度设计时,也就没有必要再用容许弯沉进行结构层控制设计,用土基顶面压应变控制土基的疲劳破坏和车辙更为直接,概念也很清楚。

但是路表弯沉指标是我国柔性路面设计中长期使用的惯用指标,加之路表弯沉具有量测方便,易于检验的优点,由于路表弯沉的70%以上是由于土基顶面变形引起的。因此,路表弯沉在某种程度上控制了土基顶面的压应变。

采用路表弯沉进行控制设计,必须采用初始设计弯沉,而不能直接用容许弯沉,考虑到由容许弯沉建立设计弯沉尚需更广泛和深入的实测资料的研究工作,加之路表弯沉的主要目的是控制土基顶面的工作状态,因此,我们可以首先建立土基顶面压应变和路表弯沉的关系,然后参考国外有关组织土基顶面容许压应变的方程来推算路表的容许弯沉值。

利用土基顶面压应变与路表弯沉的关系(方程(3)),代入AI设计方法的土基容许压应变公式^[5]为

$$\epsilon_z = 1.05 \times 10^{-2} N^{-0.223} \quad (9)$$

得相应弯沉的表达式为

$$l = 0.43 N^{-0.14} \quad (10)$$

AI设计法的荷载参数为:轴载为80KN,接地压力0.49MPa,双园当量园半径 $\delta = 11.5\text{cm}$,考虑到与BZZ-100的轴载换算为

$$N_1/N_2 = (0.7 \times 10.65^{1.5} / 0.49 \times 11.5^{1.5})^{7.14}$$

$$N = N_1 / 5.65$$

相应弯沉可以转换为

$$l = 0.43 N^{-0.14} \quad (11)$$

如果以轴载次数 $N = 10^7$ 为标准点,调整 N 的指数为0.2次方,则相应表达式为

$$l = 0.85 N^{0.2} \quad (12)$$

如果以轴载次数 $N = 10^6$ 为标准点,调整 N 指数为0.2次方,则相应表达式为

$$l = 0.76 N^{0.2} \quad (13)$$

林绣贤在文献[2]中专门对世界上有影响的设计方法的土基顶面容许压应变做了分析,认为土基顶面的容许压应变以下式最为合适:

$$\epsilon = 0.8 N^{-0.2} \quad (14)$$

如果用方程(14)代替方程(9)作上述类似的推导,则可得到相应于方程(13)弯沉表达式为

$$l = 0.84 N^{0.2} \quad (15)$$

沙庆林在文献[5]中,根据“七·五”攻关的科研成

果,对半刚性基层,沥青路面的容许弯沉做了详细分析,提出作为设计控制的容许弯沉公式为:

$$l = 2.2 N^{0.26} \quad (16)$$

仍以 $N = 10^7$ 时弯沉保持不变为条件,调整上式 N 的次方为0.2,可得到如下相应表达式:

$$l = 0.84 N^{0.2} \quad (17)$$

5 结 论

(1)应该明确新建路面初始设计弯沉和路面使用末期路面处于临界状态的容许弯沉的概念。

(2)路面设计指标应采用“设计弯沉”,而不能采用“容许弯沉”,设计弯沉小于容许弯沉。

(3)基于材料破坏原理,采用应力或应变准则进行路面结构的疲劳控制设计比“容许弯沉”控制设计更为合理和科学。当高等级公路路面结构层已采用容许弯拉应力或容许弯拉应变指标时,就路面的结构层本身而言已没有必要用“容许弯沉”来控制设计。

(4)土基的破坏将造成整个路面结构的破坏,路面设计中对土基的破坏进行控制设计是必要的。

(5)土基顶面压应变和路表弯沉之间存在着良好的相关关系。当土基顶面未用容许压应变进行控制设计时,路表弯沉设计指标在一定程度上能够控制土基顶面的压应变。根据已有的关于设计弯沉以及容许弯沉的研究工作,和由土基顶面容许压应变推导得到的设计弯沉,建议为控制土基变形或破坏而采用的设计弯沉公式为

$$l = \beta \cdot A_c \cdot A_s / N^{0.2} \quad (18)$$

式中 $\beta = 0.75 \sim 0.85$; A_c, A_s 分别是公路等级和路面类型系数,仍按现行规范规定取值。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国交通部.公路设计规范汇编.北京:人民交通出版社,1990.
- 2 林绣贤.柔性路面结构设计方法.北京:人民交通出版社,1988.
- 3 Chomton G. Applied rheology of asphalt mixes, practical applications, proceeding, third international conference on the structural designing of asphalt pavements, London, 1972, 1.
- 4 黄卫.沥青路面设计指标和设计方法[博士学位论文].东南大学,1994.
- 5 Yang H. Huang. Pavement analysis and design. Prentice Hall, 1993.
- 6 沙庆林.高等级道路半刚性路面.北京:中国建筑工业出版社,1995.