

文章编号:1671-8879(2008)04-0007-04

## 土基模量随季节变化对沥青路面设计的影响

武红娟<sup>1,2</sup>, 王选仓<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 甘肃省交通科学研究所, 甘肃 兰州 730075)

**摘 要:**针对最不利季节土基强度值过低且不能真实反映不同季节土基强度变化的问题,引入等效回弹模量作为土基强度的设计值。根据东北地区粘性土、华北地区粘性土和西北地区黄土所测得土基回弹模量随季节的变化情况,得出不同地区的等效回弹模量值。通过对不同等级、不同轴载作用下沥青路面结构设计计算,分析了不同土基强度取值对路面结构层厚度的影响。结果表明:用等效回弹模量作为土基强度的设计值,土基设计强度提高了 50%~60%,沥青路面结构层厚度平均减小 10.4 cm。

**关键词:**道路工程; 沥青路面; 土基回弹模量; 季节变化

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A

### Influence of variation of soil base's modulus with season's changing on asphalt pavement design

WU Hong-juan<sup>1,2</sup>, WANG Xuan-cang<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Gansu Province Institute of Transportation, Lanzhou 730075, Gansu, China)

**Abstract:** Because the soil base's intensity in the most disadvantage season is too low and it can not reflect the true intensity of soil in different seasons, the soil base's equivalent modulus of resilience is introduced as the design value of soil base's intensity. According to the different values of soil base's modulus of resilience on the northeastern region clay, North China clay and the northwest region loess in different seasons, the soil base's equivalent modulus of resilience can be deduced. Through the structure design of asphalt pavement under different highway grades and different axle loads, the impact of soil base's intensity on the thickness of the pavement structure is analyzed. The results show that when the equivalent soil base's modulus is taken as design value of soil base's intensity, the soil base's intensity can be increased from 50% to 60%, the thickness of asphalt pavement can be reduce 10.4 cm. 4 tabs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; soil base's modulus of resilience; season's changing

## 0 引 言

土基回弹模量是路面设计的重要力学参数,它

的确定直接影响到其他参数的选择与结构设计的结果。若土基回弹模量取值过低,计算出的路面厚度就会过厚,实际上,土基回弹模量在要求的压实度条

收稿日期:2007-08-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131882594)

作者简介:武红娟(1980-),女,山西曲沃人,甘肃省交通科学研究所助理工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:whj0116@163.com。

件下往往超过设计值,造成资金的浪费;若土基参数取值过大,施工中土基回弹模量往往达不到要求,就会引起路面的过早损坏。美国 ASSHTO 设计方法中考虑季节含水质量分数对土基强度的影响,采用有效回弹模量  $E_{se}^{[1-4]}$  作为土基强度的设计值。针对中国沥青路面设计和使用情况,利用等效回弹模量  $E_d$  代替最不利季节模量作为土基强度的设计值,可以提高土基设计强度,减薄沥青路面设计厚度<sup>[5-9]</sup>。为此,本文通过分析等效回弹模量取代最不利季节模量对沥青路面设计的影响,对路面综合弯沉系数进行了修正。

## 1 季节变化时土基回弹模量的取值

在相同荷载作用下,由于不同季节模量取值的不同,对沥青路面造成的损伤不断地变化。参考 ASSHTO 设计方法中定义相对损伤  $u_i = 1.18 \times 10^8 E_{se}^{-2.32}$ ,考虑不同季节模量对土基回弹模量取值的影响,引入等效土基回弹模量值作为中国路面设计方法中土基强度的设计参数,选用文献[2]提出的相对损伤公式  $u_i = 0.95 \times 10^7 E_d^{-5}$ ,反算等效回弹模量  $E_d$ 。

根据东北地区(粘性土)、华北地区(粘性土)和西北地区(黄土)土基情况,测得土基回弹模量  $E_0$ 。随季节变化的情况,如表 1 所示。

表 1 不同季节的土基回弹模量

月份	东北地区 (粘性土) $E_0/\text{MPa}$	华北地区 (粘性土) $E_0/\text{MPa}$	西北地区 (黄土) $E_0/\text{MPa}$	月份	东北地区 (粘性土) $E_0/\text{MPa}$	华北地区 (粘性土) $E_0/\text{MPa}$	西北地区 (黄土) $E_0/\text{MPa}$
1月	185.6	127.3	83.5	7月	32.4	39.7	33.5
2月	188.9	62.4	73.6	8月	30.5	42.5	21.2
3月	52.1	23.5	44.7	9月	43.7	58.2	28.3
4月	40.2	30.5	103.1	10月	46.8	73.2	58.4
5月	17.2	63.6	116.7	11月	38.0	68.2	70.3
6月	28.3	77.8	132.5	12月	187.8	125.4	104.5

根据表 1 的数据,按推荐公式  $u_i = 0.95 \times 10^7 E_d^{-5}$ ,反算等效回弹模量,得出 3 个地区的最不利季节模量  $E_0'$  和等效回弹模量  $E_d$ ,如表 2 所示。

由表 2 可知,对于不同地区的土基情况,按推荐公式计算所得的等效回弹模量  $E_d$  与最不利季节模

表 2 3 个地区的土基回弹模量

地 区	最不利季节模量 $E_0'/\text{MPa}$	等效回弹模量 $E_d/\text{MPa}$
东北地区(粘性土)	17.2	27.10
华北地区(粘性土)	23.5	35.95
西北地区(黄土)	21.2	32.70

量  $E_0'$  的比值为 1.5 ~ 1.6。

## 2 $E_d$ 取代 $E_0'$ 对沥青路面设计结构层厚度的影响

对以上 3 个地区的研究表明:等效回弹模量与最不利季节模量的比值  $k = 1.5 \sim 1.6$ 。本文取最不利季节模量  $E_0' = 23.0 \text{ MPa}$ ,等效回弹模量  $E_d = 35.65 \text{ MPa}$ ,即  $k = 1.55$ ,分别考虑在不同公路等级、不同累计当量轴次和不同路面结构层数对路面设计结构层厚度的影响。本文应用 APDS97 计算程序,计算沥青路面设计结构层厚度,计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知,当用  $E_d$  取代最不利季节模量  $E_0'$  时,路面结构设计层厚度随土基强度的增加而减薄,并且当  $k = \frac{35.65}{23.0} = 1.55$  时,8 种路面结构底基层的设计厚度平均减小了 10.4 cm,即用  $E_d$  取代  $E_0'$ ,将  $E_d$  作为土基强度的设计值,可以减薄路面结构设计层的厚度,减少工程造价,取得良好的经济效益。

## 3 $E_d$ 取代 $E_0'$ 对弯沉综合系数的修正

若采用  $E_d$  作为土基回弹模量的设计值,与取最不利季节的回弹模量值相比,其值均有明显地提高。由于  $E_0'$  的提高,路面结构厚度就会减薄,势必引起广泛争议。若要保持现有的结构厚度不变,同时提高  $E_0'$  的取值,只好通过弯沉综合修正系数  $F$  来调整。

已知路表弯沉计算公式为

$$l_s = \frac{2p\delta}{E_0} \alpha F \quad (1)$$

$$\text{则} \quad F = 1.63 \left( \frac{l_s}{2000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_0}{p} \right)^{0.36} \quad (2)$$

式中: $l_s$  为路面实际弯沉值(0.01 mm); $p$ 、 $\delta$  分别为标准车辆的轮胎接地压强(MPa)和当量圆半径(cm); $F$  为弯沉综合修正系数; $\alpha$  为理论弯沉系数, $\alpha = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_n}{\delta}, \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{E_0}{E_{n-1}}\right)$ ;  $E_1, E_2, \dots, E_{n-1}$  为各层材料回弹模量值(MPa);  $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$  为各结构层厚度(cm)。

若路面结构为 3 层连续体系,则

$$\alpha = \alpha' k_1 k_2, \alpha' = f\left(\frac{h_2}{\delta}, \frac{E_2}{E_1}\right) \quad (3)$$

$$k_1 = f\left(\frac{h_2}{\delta}, \frac{E_0}{E_2}\right), k_2 = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \frac{E_0}{E_2}\right) \quad (4)$$

式中: $\alpha'$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  均为中间计算参数。

在进行路面结构厚度计算时,土基强度取最不

利季节模量  $E_0'$ ,对应的弯沉值为  $l_1$ ,所求路面结构层厚度为  $H_1$ ;土基强度取等效回弹模量  $E_d$ ,对应的弯沉值为  $l_2$ ,所求的路面结构层厚度为  $H_2$ 。由于  $E_0' < E_d$ ,则  $H_1 > H_2$ 。当土基强度取为  $E_d$ ,使路面厚度  $H_2 = H_1$ ,且保持路面弯沉值  $l_2$  不变的情况下,必须对  $F$  进行修订。设  $F = A \left( \frac{l_s}{2\,000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_d}{p} \right)^{0.36}$ ,需讨论参数  $A$  的取值问题。

表 3 沥青路面设计结构层厚度

结构 1	路面结构	中粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	5/1 000 + 20/1 400 + ?/350	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$50 \times 10^4$	
	路面等级	二级	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	47.8	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	29	20
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	47.7	47.4
结构 2	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	3/1 200 + 5/1 000 + 20/1 400 + ?/350	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$200 \times 10^4$	
	路面等级	二级	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	36.3	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	40	29
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	35.7	36.1
结构 3	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	3/1 200 + 5/1 000 + 20/1 400 + ?/500	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$500 \times 10^4$	
	路面等级	二级	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	30.2	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	43	33
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	29.8	30.1
结构 4	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	4/1 200 + 8/1 000 + 20/1 400 + ?/500	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$500 \times 10^4$	
	路面等级	一级	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	27.4	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	44	34
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	27.1	27.1

结构 5	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	4/1 200 + 8/1 000 + 25/1 400 + ?/500	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$1\,000 \times 10^4$	
	路面等级	一级	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	23.9	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	45	35
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	23.9	23.8
结构 6	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 粗粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	4/1 400 + 5/1 200 + 6/1 000 + 25/1 400 + ?/500	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$1\,500 \times 10^4$	
	路面等级	一级、高速	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	22.0	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	46	36
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	22.0	21.8
结构 7	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 粗粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	5/1 400 + 6/1 200 + 7/1 000 + 30/1 400 + ?/500	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$2\,000 \times 10^4$	
	路面等级	高速	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	20.8	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	40	28
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	20.6	20.7
结构 8	路面结构	细粒式沥青混凝土 + 中粒式沥青混凝土 + 粗粒式沥青混凝土 + 水泥碎石 + 石灰土	
	厚度(cm)/模量(MPa)	5/1 400 + 6/1 200 + 7/1 000 + 30/1 400 + ?/500	
	轴载作用次数 $N_e$ /次	$3\,000 \times 10^4$	
	路面等级	高速	
	设计弯沉 $l_d/(0.01\text{ mm})$	19.2	
	模量 /MPa	23.00	35.65
	所需厚度 $h/\text{cm}$	46	35
	竣工验收弯沉 $l/(0.01\text{ mm})$	19.1	18.9

当路面结构层厚度一定时(取  $h_1$ ),采用不同土基模量的路表弯沉  $l_1$ 、 $l_2$  可分别表示为

$$l_1 = \frac{2p\delta}{E_0} a_1' k_1 k_2 1.63 \left( \frac{l_1}{2\,000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_0'}{p} \right)^{0.36} \quad (5)$$

$$l_2 = \frac{2p\delta}{E_d} \alpha_2' k_1' k_2' A \left( \frac{l_2}{2000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_d}{p} \right)^{0.36} \quad (6)$$

由式(3)可看出,当路面厚度一定时,  $\alpha_1' = \alpha_2'$ 。

由式(4)可看出,当路面厚度一定时,由于  $\frac{E_0'}{E_2}$

对  $k_2$  的影响和  $\frac{E_d}{E_2}$  对  $k_2$  的影响比较接近,故可认为

$k_2 = k_2'$ 。其中:  $k_1' = f\left(\frac{h_2}{\delta}, \frac{E_d}{E_2}\right)$ ;  $\alpha_1'$ 、 $\alpha_2'$ 、 $k_2'$  均为计算参数。

将式(5)与式(6)相比,可得

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{E_d}{E_0'} \frac{k_1'}{k_1'} \frac{1.63}{A} \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^{0.38} \left( \frac{E_0'}{E_d} \right)^{0.36} \quad (7)$$

$$\text{即 } A = 1.63 \frac{k_1'}{k_1'} \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^{0.62} \left( \frac{E_d}{E_0'} \right)^{0.64} \quad (8)$$

本文取土基强度在最不利季节的模量值为 23 MPa, 土基强度的等效回弹模量值为 35.65 MPa。根据表 3 给出的路面结构组合,在不同公路等级、不同累计轴次和不同土基模量下,采用同一路面结构厚度来确定 A 值(表 4),其中  $k_1$  和  $k_1'$  是根据路表弯沉系数诺谟图查表得出。

表 4 参数 A 值的确定

指 标	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6	结构 7	结构 8
$l_1$	47.7	35.7	29.8	27.1	23.9	22.0	20.6	19.1
$l_2$	47.4	36.1	30.1	27.1	23.8	21.8	20.7	18.9
$k_1$	2.14	2.12	2.12	2.10	2.10	2.09	2.08	2.08
$k_1'$	1.58	1.57	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.54
A	2.930	2.902	2.903	2.905	2.910	2.920	2.909	2.930

通过以上分析,取 8 种路面组合的平均值,得到  $A = 2.91$ 。则弯沉综合修正系数公式为

$$F = 2.91 \left( \frac{l_2}{2000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_d}{p} \right)^{0.36} \quad (9)$$

当  $\frac{E_d}{E_0'} = 1.55$  时,可用式(9)进行弯沉综合修正系数计算。

## 4 结 语

(1) 根据东北地区、华北地区和西部黄土地区一年中的土基回弹模量的变化情况,按推荐公式  $u_1 = 0.95 \times 10^7 E_d^{-5}$  计算,所得的等效回弹模量  $E_d$  与最不利季节模量  $E_0'$  相比,提高了 50% ~ 60%。

(2) 当用等效回弹模量  $E_d$  取代最不利季节模量  $E_0'$  进行路面设计时,路面结构底基层的设计厚度平均减小了 10.4 cm。

(3) 若要保持原有的路面结构厚度不变,需要通过弯沉综合修正系数  $F$  来调整,当  $E_d/E_0' = 1.55$

时,推荐采用弯沉综合修正系数公式进行修正。

## 参考文献:

## References:

- [1] 沈金安. 国外沥青路面设计方法汇总[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 武红娟. 土基回弹模量变化对路面设计的影响分析[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [3] 景宏君, 张 斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 14-18.  
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14-18.
- [4] 杨永红, 王选仓, 韩国杰, 等. 甘肃黄土地区土基回弹模量[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 7-10.  
YANG Yong-hong, WANG Xuan-cang, HAN Guo-jie, et al. Rebound module of subgrade in Gansu loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 7-10.
- [5] 刘巍然, 高江平. 压实黄土路基中水分迁移的数值模拟[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 5-7.  
LIU Wei-ran, GAO Jiang-ping. Numerical modeling on water migration in loess subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 5-7.
- [6] 毛雪松, 李 宁, 王秉纲, 等. 考虑相变作用的冻土路基应力与变形分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 58-62.  
MAO Xue-song, LI Ning, WANG Bing-gang, et al. Analysis model of stress and deformation of permafrost subgrade with phase changing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 58-62.
- [7] 易伟建, 周 云, 张望喜. 弹性地基板模态试验及地基动参数识别[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 1-6.  
YI Wei-jian, ZHOU Yun, ZHANG Wang-xi. Modal experiment on elastic foundation slab and identification of dynamic foundation parameters [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 1-6.
- [8] 王宇辉, 陈兴伟, 李淑明, 等. 新疆地区公路沥青路面弯沉综合修正系数[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(4): 11-14.  
WANG Yu-hui, CHEN Xing-wei, LI Shu-ming, et al. General deflection correctness coefficient of asphalt pavements in Xinjiang area [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(4): 11-14.
- [9] George K P, Uddin W. Subgrade characterization for highway pavement design[D]. Oxford: University of Mississippi, 2000.