

## 半刚性基层材料的有效模量值

贾侃<sup>1</sup>, 沙爱民<sup>1</sup>, 陆剑卿<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 南昌市市政工程设计院, 江西 南昌 330008)

**摘要:**现行半刚性基层材料弯拉模量设计值已不能真实反映材料的力学性状。总结了国内外路面结构设计中, 对半刚性基层弹性模量的选用方法, 进行了梁试件的疲劳试验和梁底拉应变的连续测定, 研究了弯拉模量衰变规律。结果表明: 半刚性基层材料在重复加载过程中动态弯拉模量呈现出 3 个阶段衰变的特征; 路面结构设计中, 材料模量的有效值的选取应该考虑模量值的阶段性变化。

**关键词:**道路工程; 半刚性基层材料; 动态模量; 衰变规律; 有效模量

**中图分类号:**U414.1

**文献标志码:**A

## Effective modulus value of semi-rigid base course materials

JIA Kan<sup>1</sup>, SHA Ai-min<sup>1</sup>, LU Jian-qing<sup>2</sup>

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

2. Nanchang City Institute of Municipal Engineering Design, Nanchang 330008, Jiangxi, China)

**Abstract:** The current design value of flexural-tensile modulus of semi-rigid base course materials can not truly reflect the mechanic performance of the materials. The selecting methods of elastic modulus of semi-rigid base course materials in many countries were summarized, the fatigue test of a beam made by the semi-rigid base course materials was carried out, the tensile-stress under the beam's bottom was measured continually, and the deterioration laws of dynamic flexural-tensile modulus of the semi-rigid base course materials were studied. The results show that, the dynamic flexural-tensile modulus deterioration has a three-stage facture, the selection of effective modulus value must be combined with its stage change in the design of pavement structure. 11 tabs, 2 figs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; semi-rigid base course material; dynamic modulus; deterioration law; effective modulus

## 0 引言

中国现行沥青路面设计指标体系中的设计参数多为静态参数, 并且材料的弯拉模量是受荷的初始值; 室内测定模量试验时, 材料试件处于完好状态, 并非是路面使用过程中重复荷载下的有效值。实际沥青路面结构中, 由于材料自身的非均匀性、施工成

型方式以及温度、湿度等环境因素作用, 在开放交通前或初期便产生了一些微裂隙。在重复行车荷载作用下, 这些裂缝会进一步扩展, 使材料模量值降低。因此, 现行材料弯拉模量设计值不能真实反映材料在环境、交通下的实际力学性状, 直接选用室内试件的模量测定值作为路面结构分析的材料参数, 会使计算结果出现较大偏差<sup>[1]</sup>。考虑到半刚性基层材料

收稿日期: 2008-02-10

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2004 318 000 04)

作者简介: 贾侃(1976-), 男, 山东泰安人, 工学博士研究生, E-mail: jkatz@sohu.com。

在沥青路面使用过程中的性能变化较大,本文在研究半刚性基层材料室内动态弯拉模量衰变规律的基础上,结合加速、加载现场试验,提出在路面结构设计中应使用的有效模量值。

## 1 国内外研究概况

各国路面设计方法中,对半刚性基层材料模量的选用大致可分为 3 种情况:单一模量法、两阶段模量法和衰变模量法。

### 1.1 单一模量法

在路面结构计算分析时,单一模量法不考虑基层材料在使用过程中的模量衰变。中国和法国的沥青路面设计中即采用单一模量法<sup>[2]</sup>,表 1 为中法两国相同类型的基层材料的模量代表值。其中,中国设计方法中的基层模量为静态弯拉模量;法国设计方法中的基层模量为动态弯拉模量。

表 1 中法两国沥青路面设计方法中基层材料的模量值

MPa

半刚性基层类型	中国		法国	
	抗压模量	劈裂强度	弹性模量	弯拉强度
水泥碎石	1 300~4 200	0.4~0.6	20 000~30 000	0.80~1.20
水泥砂砾	1 100~1 700	0.4~0.6	4 000~18 000	0.50~0.75
二灰碎石、二灰砂砾	1 100~1 700	0.5~0.8	30 000~40 000	1.15

### 1.2 两阶段模量法

两阶段模量法以南非和澳大利亚为代表。南非的设计方法:在半刚性基层材料使用中,将性状分为两个阶段,即疲劳开裂前阶段和疲劳开裂后阶段。疲劳开裂前阶段又包括材料完好状态(即材料的室内试验模量)和材料微裂缝状态;疲劳开裂后阶段也可以分为裂缝扩展状态和材料碎裂为粒料状态<sup>[3]</sup>(表 2)。

表 2 南非沥青路面设计方法基层材料的两阶段模量值

MPa

半刚性基层材料类型	竣工初期		交通荷载引起的衰变		无侧限抗压强度
	材料完好	微裂缝阶段	宏观裂缝阶段	材料碎裂为粒料阶段	
水泥处治	6 000~30 000	2 500~3 000	800~1 000	100~600	6.00~12.00
级配碎石	3 000~11 000	2 000~2 500	500~800	300~500	3.00~6.00
水泥处治	2 000~10 000	1 000~2 000	500~800	200~400	1.50~3.00
天然碎石	500~7 000	500~2 000	100~600	100~300	0.75~1.50

澳大利亚设计方法考虑半刚性基层材料裂缝出现后的扩展效应。随着裂缝的扩展,半刚性基层材料的刚度逐步下降到未参加结合料之前的粒料水平。在半刚性基层材料完好阶段,弹性模量与无侧

限抗压强度(UCS)之间的对比关系,前者为后者的 1 500 倍。对结构进行疲劳开裂后的力学计算时,半刚性基层材料的竖向模量为 500 MPa。

### 1.3 衰变模量法

衰变模量法以美国 AASHTO(2002)方法为代表<sup>[4]</sup>。在结构计算时,考虑半刚性基层材料随时间而逐渐衰变(表 3)。水泥处治粒料、水泥混凝土和二灰处治集料的模量定义为弹性模量;石灰处治土定义为回弹模量。设计时以 14~28 d 为一分析段,不同分析段选用相应的模量值计算力学响应量。模量随疲劳损耗下降的关系式为

$$E_h(D) = E_{b,\max} + \frac{E_{b,\max} - E_{b,\min}}{1 + e^{-4+14D}} \quad (1)$$

式中: $D$  为半刚性基层材料疲劳损耗率,以小数计; $E_h(D)$  为半刚性基层材料不同损耗率下的模量值; $E_{b,\max}$ 、 $E_{b,\min}$  分别为半刚性基层材料完好时的最大、最小模量值。

表 3 AASHTO 半刚性基层材料的模量代表值 MPa

半刚性基层材料类型	破坏前模量	破坏后模量	弯拉强度
水泥处治集料	6 895	689	1.379
水泥处治开级配集料	5 171	345	1.379
水泥混凝土	3 448	172	0.689
石灰、水泥、粉煤灰处治	10 342	276	1.034
石灰土	310	103	0.172

## 2 半刚性基层材料的模量衰变规律

材料模量的衰变反映了材料力学性质的弱化过程。作者应用梁试件的疲劳试验和梁底拉应变的连续测定,对半刚性基层材料的弯拉模量衰变规律进行了试验研究。试验选用水泥稳定砂砾、水泥稳定碎石(悬浮密实型和骨架密实型)、水泥稳定土和石灰-粉煤灰稳定碎石 5 种混合料,并分别采用 3 种或 4 种应力比对梁试件进行重复加载。

### 2.1 基层材料的室内模量衰变规律

由动态拉应变测定值计算得到动态弯拉模量,并相应绘制出模量随重复加载次数的增加而衰变的曲线<sup>[5]</sup>。以水泥稳定砂砾为例,图 1(见下页)所示为在不同应力比水平下的动态弯拉模量衰变曲线。其中, $E/E_0$  为模量与初始模量的比值; $N/N_0$  为疲劳加载循环比。弯拉模量随加载次数的增加而减小,与应变发展相对应,模量衰减可分为 3 个阶段:迅速衰减阶段(第 1 阶段)、稳定降低阶段(第 2 阶段)和快速破坏阶段(第 3 阶段)。

第 1 阶段,材料弯拉模量迅速下降且不稳定,该

阶段约占总疲劳寿命的 20%;第 2 阶段,材料的弯拉模量衰减速率基本为一定值,弯拉模量值与循环次数基本呈线性关系,衰变的快慢与所加荷载的大小有关,此阶段约占总疲劳寿命的 60%;第 3 阶段,半刚性材料的循环模量值急剧下降,直至疲劳破坏,该阶段约占循环寿命的 20%。表 4 列出了不同结构类型的半刚性基层材料的模量衰变阶段。

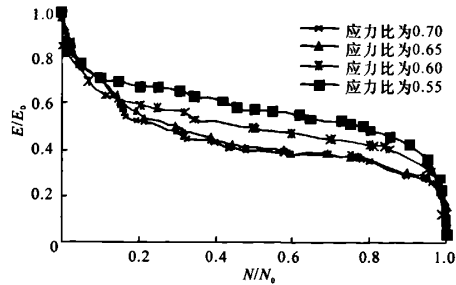


图 1 水泥稳定砂砾模量比与加载循环比的关系曲线

表 4 不同类型半刚性基层材料的模量衰变阶段 %

材料类型 (结构类型)	模量衰变阶段约占总疲劳寿命的比例		
	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段
水泥稳定砂砾	20	60	20
水泥稳定碎石(悬浮密实)	20	60	20
水泥稳定碎石(骨架密实)	20	60	20
水泥稳定细粒土	18	62	18
二灰稳定碎石(悬浮密实)	15	75	10

对 5 种半刚性基层材料模量的第 2 阶段衰变规律进行汇总分析,其衰变率  $K$  计算结果见表 5。表 5 中,  $E_1$  为第 2 阶段初始模量值;  $N$  为疲劳加载次数。试验结果表明,应力水平越大,  $K$  值越大,即材料所受的荷载越大,模量衰变越快<sup>[6]</sup>。

2.2 模量衰变与材料结构的关系

材料结构类型对弯拉模量衰变有较大影响。试验结果表明,骨架密实结构的初始模量值大于悬浮密实结构的初始模量值。在整个疲劳加载过程中,骨架密实结构的模量值整体上要大于悬浮密实结构的模量值。

不同结合料的半刚性基层材料的模量衰变规律有所差异,其主要集中在初始模量值的大小不同,以及各阶段衰变的幅度不同。水泥稳定土在疲劳加载过程中,模量值在第 2 阶段初期时衰变为初始值的 75%左右;其他水泥稳定碎石(砂砾)对应模量值约为初始值的 60%(表 6)。由于后者材料本身的缺陷,如粘结料与粗粒土的薄弱界面较多、粘结程度较细粒土弱、无机结合料稳定粗粒土的内部空隙较多等原因,导致第 1 阶段的模量不稳定、衰减较大。

表 5 半刚性基层材料模量衰变第 2 阶段的衰变率

材料类型 (结构类型)	应力比	回归方程 $E_1 = E_0 - KN$ , $K = dE_1/dN$	相关系数
水泥稳定砂砾	0.70	0.462 3	0.899 5
	0.65	0.410 8	0.983 2
	0.60	0.341 1	0.976 8
	0.55	0.003 6	0.888 4
水泥稳定碎石 (悬浮密实)	0.70	0.163 2	0.975 8
	0.65	0.082 3	0.924 2
	0.60	0.046 1	0.990 7
水泥稳定碎石 (骨架密实)	0.70	0.150 0	0.986 3
	0.65	0.111 6	0.986 3
	0.60	0.016 8	0.983 5
水泥稳定 细粒土	0.80	0.003 1	0.986 5
	0.75	0.002 1	0.934 3
	0.70	0.001 9	0.978 7
	0.65	0.001 2	0.909 0
二灰稳定碎石 (悬浮密实)	0.75	0.232 6	0.976 1
	0.70	0.154 6	0.981 4
	0.65	0.012 1	0.985 1

表 6 不同半刚性基层材料的模量衰变阶段 %

材料类型 (结构类型)	模量衰变第 2 阶段初的模量值 与初始模量值的比值
水泥稳定砂砾	60
水泥稳定碎石(悬浮密实)	60
水泥稳定碎石(骨架密实)	60
水泥稳定细粒土	75
二灰稳定碎石(悬浮密实)	60

相同结构类型下,不同粘结料的基层材料表现出不同的模量衰变特性。如悬浮密实结构的水泥稳定碎石和二灰稳定碎石相比(表 7),在相同应力比下,前者的第 2 阶段的模量衰变率要大于后者,且前者的初始模量值小于后者。

表 7 悬浮密实结构的水泥稳定碎石和二灰稳定碎石模量衰变率对比

材料类型	初始模量值/ MPa	第 2 阶段的模量衰变率/%	
		应力比为 0.70	应力比为 0.65
水泥稳定碎石	28 000	16.32	8.23
二灰稳定碎石	45 000	15.46	1.21

3 半刚性基层材料的有效模量值

3.1 室内试验的模量有效值

本文以半刚性基层材料室内弯拉模量衰变曲线的阶段过渡点和中点(即疲劳寿命的 20%、50%和 80%)作为特征点,依据 5 种混合料的疲劳试验结

果,确定这些特征点处的模量衰变比值,并由初始动态弯拉模量值确定相应的衰变后动态弯拉模量值。

室内试验结果表明:当试件疲劳寿命达到总疲劳寿命的 50%时,水泥稳定砂砾的模量为初始值的 0.40~0.58;水泥稳定碎石(悬浮密实)的模量为初

始值的 0.37~0.50;水泥稳定碎石(骨架密实)的模量为初始值的 0.45~0.60;水泥稳定细粒土的模量为初始值的 0.58~0.72;二灰稳定碎石的模量为初始值的 0.55~0.62。当达到疲劳寿命的 20%、80%时,对应的模量比值及有效模量值见表 8、表 9。

表 8 不同疲劳寿命时半刚性基层材料的模量比值

材料类型(结构类型)	水泥稳定砂砾	水泥稳定碎石(悬浮密实)	水泥稳定碎石(骨架密实)	水泥稳定细粒土	二灰稳定碎石(悬浮密实)
应力比	0.55~0.70	0.60~0.70	0.60~0.70	0.65~0.85	0.65~0.75
20%疲劳寿命模量比	0.53~0.68	0.42~0.61	0.58~0.70	0.65~0.75	0.62~0.69
50%疲劳寿命模量比	0.40~0.58	0.37~0.50	0.45~0.60	0.58~0.72	0.55~0.62
80%疲劳寿命模量比	0.35~0.48	0.28~0.37	0.39~0.51	0.51~0.65	0.50~0.57

表 9 不同半刚性基层材料的有效模量值范围

材料类型(结构类型)	水泥稳定砂砾	水泥稳定碎石(悬浮密实)	水泥稳定碎石(骨架密实)	水泥稳定细粒土	二灰稳定碎石(悬浮密实)
初始弯拉模量值	28 000	25 000	28 000	4 700	45 000
20%疲劳寿命有效模量值	14 840~19 040	10 500~15 250	16 240~19 600	3 055~3 525	27 900~31 050
50%疲劳寿命有效模量值	11 200~16 240	9 250~12 500	12 600~16 800	2 726~3 384	24 750~27 900
80%疲劳寿命有效模量值	9 800~13 440	7 000~9 250	10 920~14 280	2 397~3 055	22 500~25 650

3.2 试验路基层材料的有效模量值

在室内疲劳试验的基础上,本文采用相同的材料类型和配合比(质量比),在室外铺筑了半刚性基层材料试验路,并采用加速、加载仪器(ALF)进行了试验。通过对悬浮密实结构水泥稳定碎石基层材料 ALF 试验路采用落锤式弯沉仪(FWD)进行弯沉值检测,反算半刚性基层材料在逐步发生疲劳损坏过程中的模量。结果表明,其与室内材料动态弯拉模量有相似的变化规律<sup>[7]</sup>,即基层模量随加载次数的增加有 3 个明显的衰变阶段(图 2)。

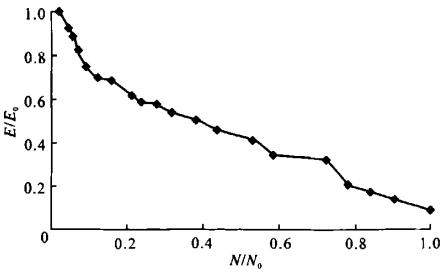


图 2 试验路基层模量比与加载循环比的关系曲线

通过对水泥稳定碎石试验路基层模量  $E$  与疲劳寿命  $N_f$  的回归,可以得到其间较好的线性关系, $E = -0.017\,3\,N_f + 9\,151.4$ 。对应室内材料有效模量的确定方法,疲劳寿命的 20%时基层有效模量值为 7 421 MPa;疲劳寿命的 50%时基层有效模量值为 4 826 MPa;疲劳寿命的 80%时基层有效模量值为 2 231 MPa。试验路基层模量有效模量平均值是室内相应有效模量值的 1/3~2/3。

3.3 室内有效模量值与基层模量有效值的区别

试验路段现场 FWD 反算确定的动态模量与室内疲劳试验确定的动态弯拉模量相差很大。主要原因是,室内动态弯拉模量试验的试件与实际路面状态下的半刚性基层材料不一致。由室内试验得到的试件动态弯拉模量,反映的是半刚性基层材料处于完好状态下的应力-应变关系,其数值较高;而实际路面基层中半刚性基层材料的状态不同于试件,在开放交通前和初期,半刚性基层材料内部就由于温缩和干缩等原因产生了收缩裂缝,这些微裂缝的出现,使结构层的性状发生变化,从而导致弯拉模量的较大下降。一般认为,材料完好状态下的模量值是收缩裂缝阶段模量值的 1~10 倍<sup>[8-9]</sup>。

3.4 设计模量有效值

以上分析表明,室内材料弯拉模量和实际路面结构层的弯拉模量测试状态不同。基层模量的设计值若直接选用室内试件的模量测定值,会由于模量值偏大而使路面结构分析计算结果偏差增大。在路面结构设计中,半刚性基层模量应选用路面结构实际使用状态的有效模量。本文结合室内外试验结果,参考南非路面力学设计方法中含收缩裂缝的模量建议值方法,提出半刚性基层材料的弹性模量设计值(表 10,见下页)。

对旧沥青路面进行路况评定和改建设计时,应按路面结构已承受的荷载累计作用次数和疲劳损耗比例,对材料的设计模量值进行折减。本文提出的半刚性材料的模量折减系数见表 11(见下页)。在疲

表 10 半刚性基层材料弹性模量参考值 MPa

材料类型	7 d 浸水 抗压强度	试件模量	收缩开裂 后模量	疲劳破坏 后模量
水泥稳	3.0~6.0	3 000~14 000	2 000~2 500	300~500
定类	1.5~3.0	2 000~10 000	1 000~2 000	200~400
石灰-粉煤	≥0.8	3 000~14 000	2 000~2 500	300~500
灰稳定类	0.5~0.8	2 000~10 000	1 000~2 000	200~400
石灰稳	≥0.8	2 000~4 000	800~2 000	100~300
定类	0.5~0.8	1 000~2 000	400~1 000	50~200

表 11 半刚性基层材料在不同疲劳损耗阶段的模量折减系数

材料类型	疲劳寿命不同损耗(%)时的模量折减系数		
	20	50	80
水泥稳定碎石	0.42~0.70	0.37~0.60	0.30~0.50
水泥稳定细粒土	0.65~0.75	0.58~0.72	0.50~0.65
石灰-粉煤灰 稳定类	0.62~0.69	0.55~0.62	0.50~0.60

寿命终止时半刚性基层和底基层材料碎裂成粒料状后的模量值,可参照表 10 中最后一列。

4 结 语

(1)在重复加载过程中,半刚性基层材料的弯拉模量将分 3 个阶段衰减:初期的迅速衰减阶段、中期的稳定降低阶段和后期的快速破坏阶段;路面结构设计中,材料模量有效值的选用应该考虑模量值的这种阶段性的显著变化。

(2)以动态弯拉模量衰变曲线的阶段过渡点和中点(即疲劳寿命的 20%、50%和 80%)作为特征点,依据半刚性基层材料室内疲劳试验结果,确定这些特征点处的衰变后模量比值,并由初始动态弯拉模量值确定相应的衰变后动态弯拉模量值。

(3)室内材料弯拉模量和实际路面结构层的弯拉模量开始衰变的初始模量不同,设计中半刚性基层模量应选用实际路面使用状态下的有效模量;本文提出了各种半刚性基层材料相应的弹性模量设计参考值。

参考文献:

References:

[1] 姚祖康. 对国外沥青路面设计指标的评述:连载一[J]. 公路,2003(3):18-25.

YAO Zu-kang. The review of the design indexes of foreign asphalt pavement: Part I[J]. Highway, 2003 (3):18-25.

[2] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

[3] Theyse H L, Beer M D, Rust F C. Overview of the South African mechanistic pavement design analysis method[C]//TRB. Transportation Research Record 1539, Washington DC:TRB,1996;6-17.

[4] Judycki J. Comparison of fatigue criteria for flexible and semi-rigid pavements[C]//Applied Research Associates Inc. 8th International Conference on Asphalt Pavements. Toronto: Applied Research Associates Inc, 1997;38-57.

[5] 王旭东,沙爱民,许志鸿. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[6] 王时越,张立翔,徐人平,等. 混凝土疲劳刚度衰减规律试验研究[J]. 力学与实践,2003,25(5):55-57.

WANG Shi-yue, ZHANG Li-xiang, XU Ren-ping, et al. Deterioration laws of concrete elastic modulus under fatigue loading[J]. Mechanics and Engineering, 2003,25(5):55-57.

[7] 廖卫东,王小雄. 沥青加铺层抗反射裂缝足尺疲劳试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):9-12.

LIAO Wei-dong, WANG Xiao-xiong. Full-scale-fatigue test on anti-reflective cracking of asphalt overlay [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(5):9-12.

[8] 解晓光,王哲人. 沥青碎石混合料动力变形特性研究[J]. 中国公路学报,2006,19(2):24-30.

XIE Xiao-guang, WANG Zhe-ren. Research on dynamic deformation characteristic of asphalt macadam mixture[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(2):24-30.

[9] 罗 辉,朱宏平,郝行舟. 沥青路面动态响应数值分析[J]. 交通运输工程学报,2006,6(1):44-47,53.

LUO Hui, ZHU Hong-ping, HAO Xing-zhou. Numerical analysis of dynamic response on asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2006,6(1):44-47,53.