

# 水泥路面基层模量及厚度力学性能分析

张荣辉, 王 艳, 雷正辉

(广东工业大学, 广东广州 510006)

**摘 要:**采用数值计算的方法对路面在不同基层模量及厚度时的受力性能、抗疲劳性能进行分析比较, 得出提高基层的模量及增加基层的厚度可以明显改善路面的受力性能、提高路面的疲劳使用寿命, 进一步指出基层模量的提高可以通过改变基层的级配组成来实现。

**关键词:**数值计算; 模量及厚度; 受力性能; 疲劳寿命; 基层级配

**中图分类号:**U416.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)06-0016-03

## 0 前言

基层作为路面结构的一个组成部分, 直至 80 年代才将其提到了较为重要的位置, 而 60 年代修建的水泥路面, 只需垫层而不用基层。70 年代修建的水泥路面, 路基的顶面回弹模量要求不高。这一发展历程充分说明了基层在路面结构中的重要性, 公路水泥混凝土路面设计规范<sup>[1]</sup>中给定了水泥稳定粒料基层的模量范围为 1 300 MPa~1 700 MPa, 厚度范围为 150 ~ 250 mm, 我国现已成为世界上水泥混凝土路面拥有里程最多的国家, 基层中光水泥稳定类的就占据了相当大部分, 但就其使用现状来看, 存在不少问题, 特别是一些早期修建的水泥混凝土路面都出现了不同程度的破坏和缺陷, 大大缩短了路面的使用寿命, 究其原因: 主要考虑路面的受力特性, 忽略了基层模量及厚度的变化对水泥混凝土路面的使用性能有极大的影响; 现有级配基层的模量偏低, 厚度偏薄。鉴于此, 本文着重数值计算, 考虑基层模量及厚度的变化对面板的挠度、应力及荷载和温度疲劳作用下的使用寿命的分析, 并对现有规范规定的路面基层级配组成进行改进, 在此基础再来增加基层的厚度可以大大改善路面的受力性能、提高路面的疲劳使用寿命。

## 1 变基层模量及厚度对板中挠度的影响

文克勒地基模型中<sup>[2]</sup>, Westergaard 推导得到半径为  $\alpha$  圆形荷载作用下板中挠度方程为:

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{\alpha}{2l} \right) - 0.673 \right] \left( \frac{\alpha}{l} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

式中,  $\Delta_i$ ——板中荷载产生的最大挠度;

$P$ ——荷载;

$\alpha$ ——接触面半径, 对于汽 -10 荷载, 取 0.15m;

$k$ ——地基反应模量, 可通过《AASHTO》路面结构设计指南中的地基反应模量用图得出;

$l$ ——相对刚度半径。

$$l = \left[ \frac{Eh^3}{12(1-u^2)k} \right]^{0.25} \quad (2)$$

式中,  $E$ ——混凝土的弹性模量(MPa);

$h$ ——板的厚度(cm);

$u$ ——混凝土的泊松比。

路面结构设计见图 1。

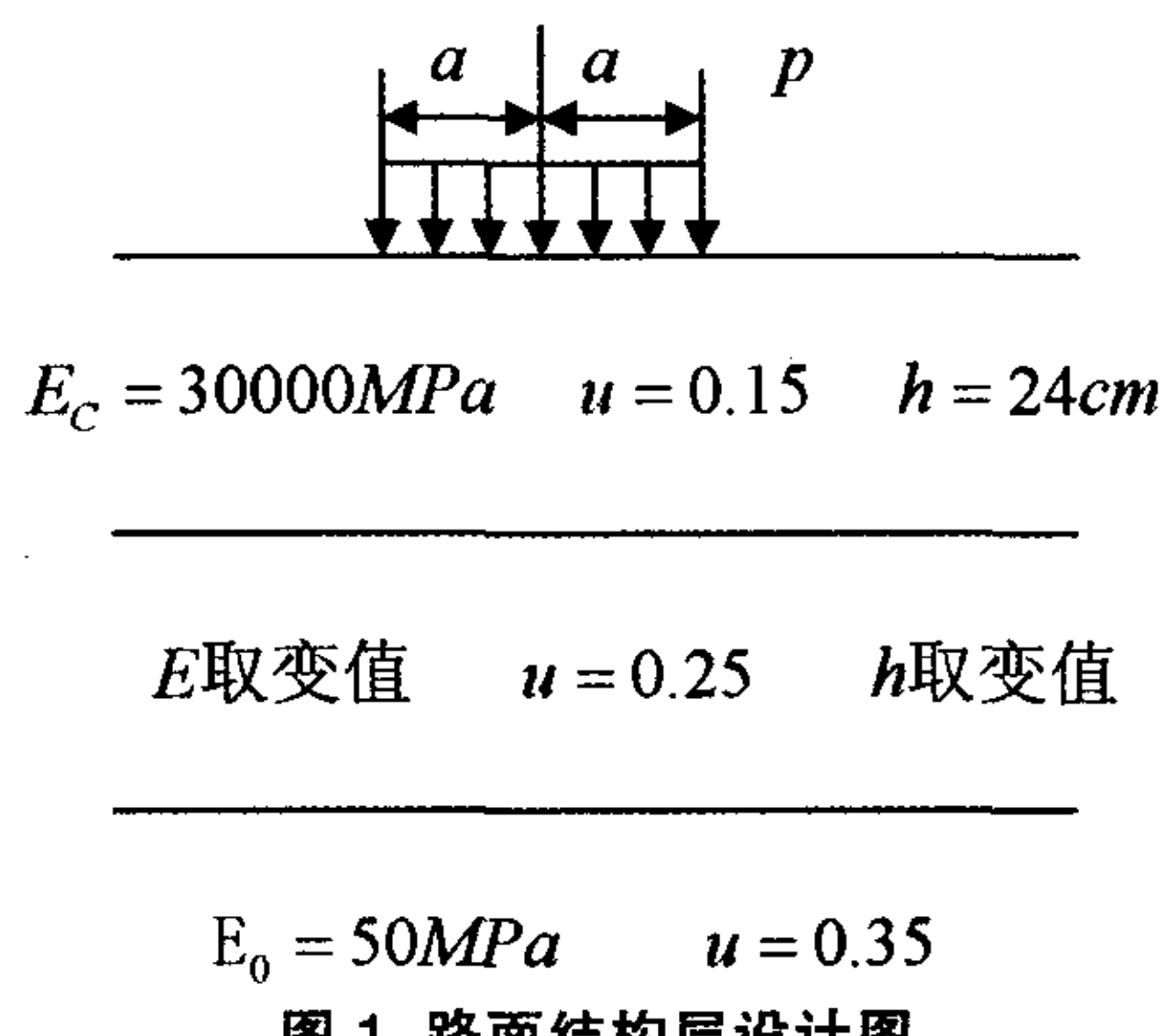


图 1 路面结构层设计图

假设路面结构按图 1 所示, 基层厚度取 15 cm、20 cm、25 cm、30 cm、35 cm, 基层模量分别取 900 MPa、1 200 MPa、1 500 MPa、2 000 MPa、3 000 MPa 时得到的地基反应模量  $k$  值见表 1。

表 1 地基反应模量  $k$  值(单位:  $10^4 \text{ kN/m}^3$ )

模量 $k$ 厚度	900 MPa	1200 MPa	1500 MPa	2000 MPa	3000 MPa
150 mm	14.38	15.2	16.28	17.63	18.99
200 mm	16.28	17.63	18.99	20.35	21.70
250 mm	17.63	20.35	21.70	23.06	25.77
300 mm	20.35	23.06	24.15	25.77	28.49
350 mm	21.7	24.42	27.13	28.49	31.20

从表 1 中可以看出: 基层模量一定时, 随着基层厚度的增加  $k$  值也在增加, 同时基层厚度一定

收稿日期: 2006-09-28

作者简介: 张荣辉(1952-), 男, 广西人, 副教授, 从事道路桥梁研究工作。



时随着基层模量的增加  $k$  值也在增加。

将  $k$  值代入公式(2)得到计算刚度,再将其它参数值一并代入公式(1)得到不同基层模量相应不同基层厚度时的板中挠度变化值,见图 2。

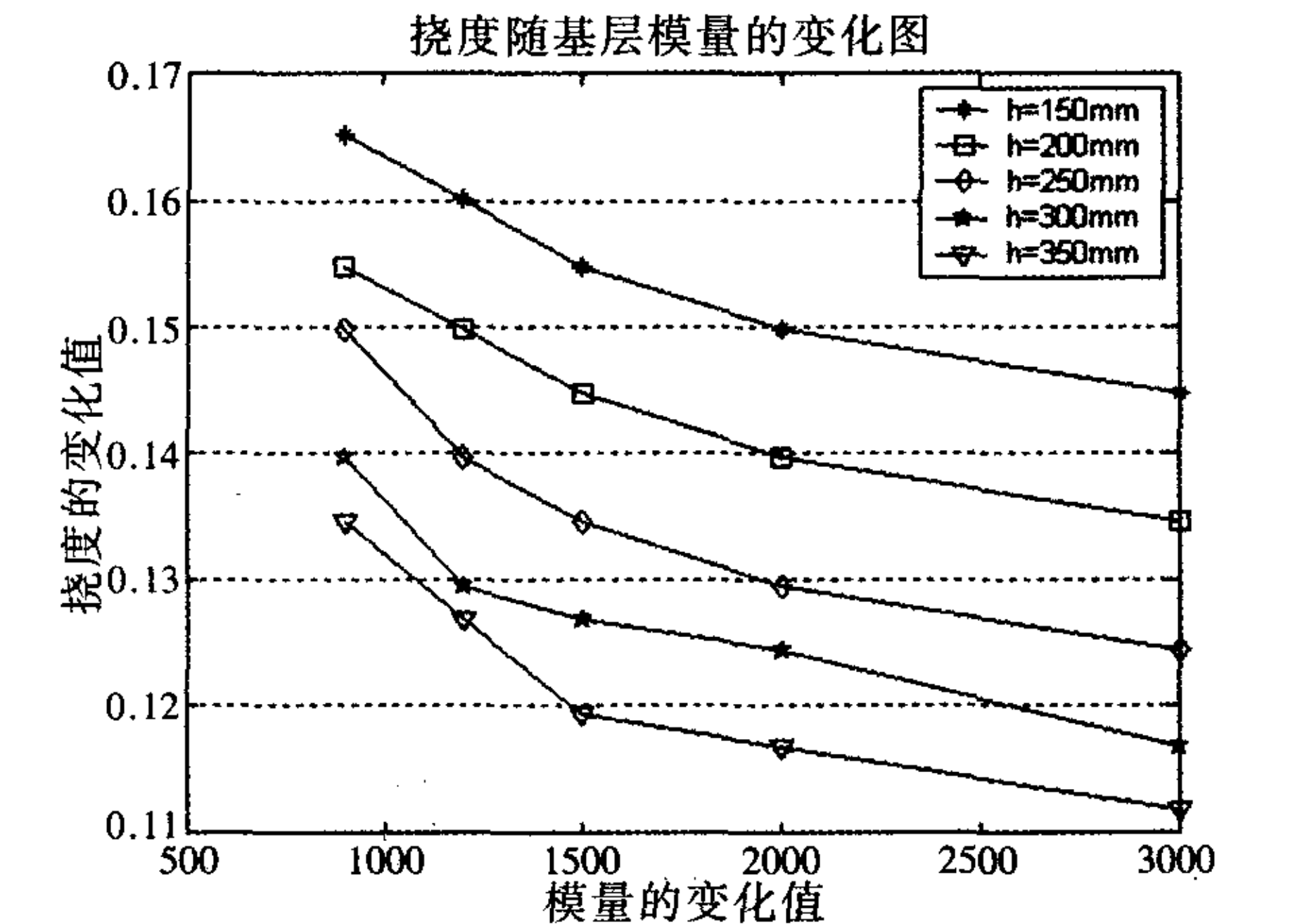


图 2 板中挠度随基层模量及厚度的变化图

从图 2 中可以看出当基层厚度一定时,随着模量的增加,板中挠度在逐渐减小;反之亦然,对于水泥混凝土路面提高路面基层的模量以及厚度,可以明显改善路面的使用性能。

2 变基层模量及厚度对板中应力的影响

Westergaard 推导得到半径为 圆形荷载作用下板中应力公式为<sup>[2]</sup>:

$$\sigma_i = \frac{3(1+u)P}{2\pi h^2} \left( \ln \frac{l}{b} + 0.6159 \right) \quad (3)$$

式中,  $\sigma_i$  ——在半径为  $a$  圆形荷载作用下板中最大应力(MPa);

$b$  ——参数;

当  $\alpha \geq 1.724h, b = \alpha$   
当  $\alpha < 1.724h, b = \sqrt{1.6\alpha^2 + h^2} - 0.675h$  ;

其余参数同公式(1)及(2)。

将各参数值代入公式(3)后得到不同基层模量相应不同基层厚度时的板中最大应力变化值,见图 3。

由图 3 可以看出:当基层厚度一定时,随着基层模量的增加,板中应力呈总体下降趋势,即模量的增加可以明显降低板中的最大应力值;当模量为定值时,随着基层厚度的增加,板中应力也在相应减小,这就表明了,对于水泥混凝土路面提高基层的模量及厚度对路面结构的受力是有利的。

3 荷载及温度疲劳应力作用下变基层模量及厚度对面板的使用寿命分析

(1)文献[1]中,水泥混凝土路面结构设计以

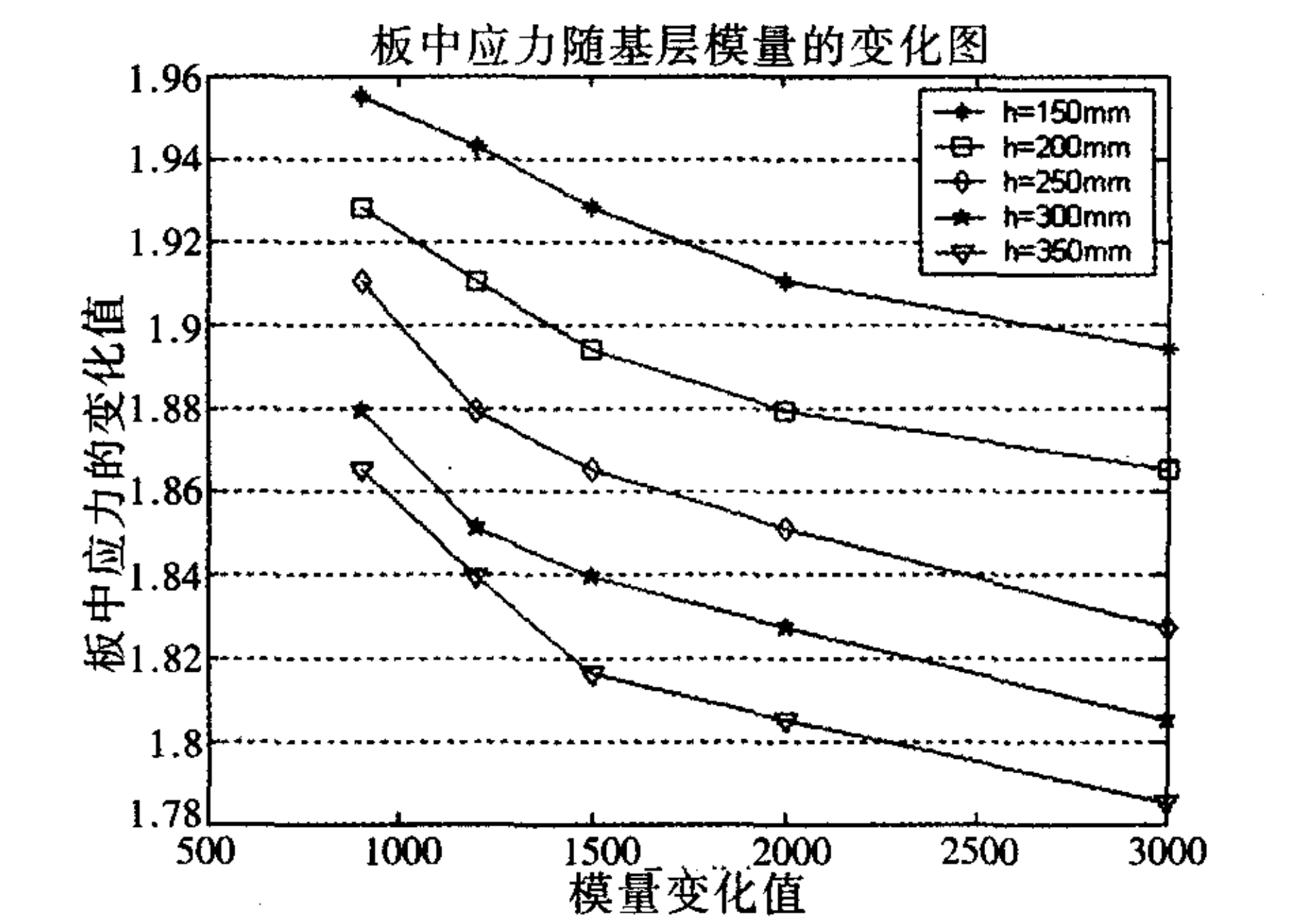


图 3 板中应力随基层模量及厚度的变化图

行车荷载和温度梯度综合作用产生的疲劳断裂作为设计的极限状态:

$$\sigma_{pr} + \sigma_{tr} \leq f_r \quad (4)$$

式中,  $f_r$  ——混凝土设计弯拉强度,取  $f_r = 5.0$  MPa;

$\sigma_{pr}$  ——荷载疲劳应力(MPa);

$\sigma_{tr}$  ——温度疲劳应力(MPa)。

(2)变基层模量及厚度时温度作用的疲劳应力  
温度疲劳应力可由下式进行计算:

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{tm} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{tr}$  ——临界荷位处的温度疲劳应力(MPa);

$\sigma_{tm}$  ——最大温度梯度时混凝土板的温度翘曲应力(MPa);

$k_t$  ——温度疲劳作用系数。

由上式得出变基层模量时的温度疲劳应力,计算时假定板尺寸为  $5 \times 3.5$  m<sup>2</sup>,板厚为 24 cm,自然区为 II,详细的计算结果见表 2。

其中,

$$\sigma_{tm} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_g}{2} B_x \quad (6)$$

$$k_t = \frac{f_r}{\sigma_{tm}} \left[ \alpha \left( \frac{\sigma_{tm}}{f_r} \right)^c - b \right] \quad (7)$$

式中,  $B_x$  ——温度应力系数(查规范[2]的附图);

$\alpha_c$  ——混凝土线性膨胀系数,取  $\alpha_c = 1 \times 10^{-5}$  (1/℃);

$T_g$  ——最大温度梯度;取  $T_g = 83$  ℃/m;

$abc$  ——为回归系数。

表 2 不同基层模量及厚度时的温度疲劳应力(单位:MPa)

模量 $\sigma_r$ 厚度	900 MPa	1200 MPa	1500 MPa	2000 MPa	3000 MPa
150 mm	0.932	0.956	0.956	0.968	0.98
200 mm	0.956	0.968	0.98	0.992	0.98
250 mm	0.98	0.992	0.98	0.968	0.968
300 mm	0.992	0.992	0.956	0.968	0.956
350 mm	0.98	0.956	0.968	0.956	0.944



(3)变基层模量及厚度时的疲劳应力比较分析  
令公式(4)中为等号,即  $\sigma_{pr} + \sigma_{tr} = f_r$  进而可得到:

$$0.9 \times Ne^{0.057} \times 1.2 \times \sigma_{ps} + \sigma_{tr} = 5.0$$

$$\text{其中: } \sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_{pr}$ ——标准轴载  $p$  在临界荷位处产生的荷载疲劳应力(MPa);

$\sigma_{ps}$ ——标准轴载 在四边自由板的临界荷位处产生的荷载应力(MPa);

$k_r k_f k_c$  为考虑荷载时相应的系数。

由(8)可以推导出变模量下的路面板使用寿命表达式为:

$$Ne = \left( \frac{4.63}{\sigma_{ps}} - 0.926 \frac{\sigma_{tr}}{\sigma_{ps}} \right)^{17.544} \quad (9)$$

式中,  $Ne$ ——标准轴载作用下路面板使用寿命;

$\sigma_{tr}$ ——变基层模量及厚度下的温度疲劳应力值,可根据表 2 选用。

$\sigma_{ps}$  按(10)计算可得:

$$\sigma_{ps} = 0.077r^{0.6}h^{-2} \quad (10)$$

根据(9)式计算得到的路面板在变基层模量下的使用寿命见图 4。

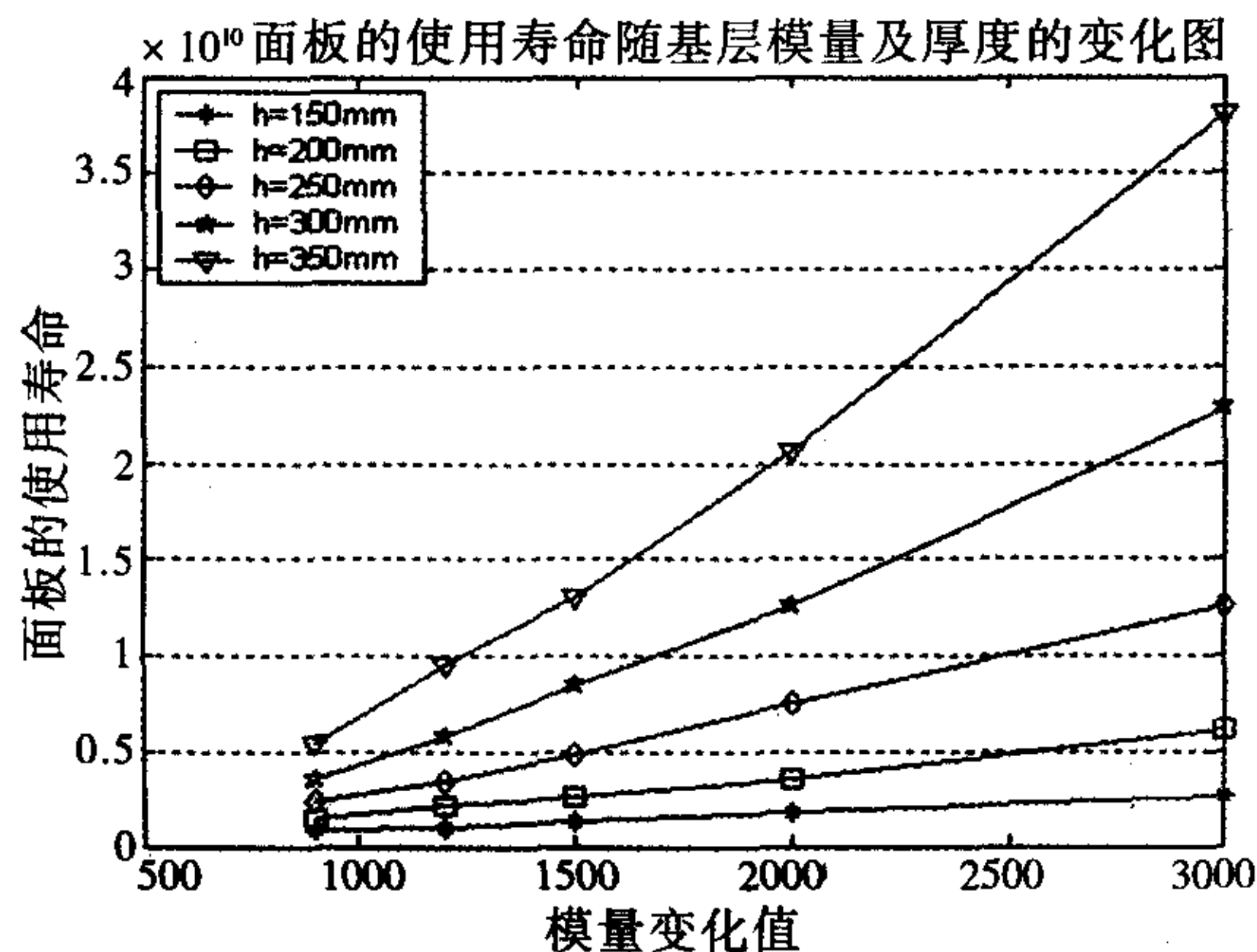


图 4 路面板使用寿命随基层模量及厚度变化图

由图 4 可以看出:路面板在温度及荷载疲劳应力作用下的疲劳寿命随基层模量值的增加而增加,当基层较薄时,相应的路面板疲劳寿命随基层模量的增加而呈线性增加,基层越厚增加的幅度越大,同样,基层模量一定时,疲劳寿命随厚度的增加而增加,模量越高,疲劳寿命随厚度变化的幅度就越大,图 4 表明了水泥混凝土基层的疲劳寿命可以通过提高基层的模量及增加基层的厚度而得到提高。

## 4 提高基层模量的级配组成设计

### 4.1 级配选择

选取规范级配<sup>[3]</sup>及按骨架密实结构的原则<sup>[4-6]</sup>调整的级配各一组,参照规范<sup>[7]</sup>进行试件成型并对模量进行检测,级配组成及最终检测的试件 7 d 模量值见表 4。

由表 4 可以看出,调整后的级配模量值明显高于按规范选取级配的模量值,而且模量值随着龄期而增长,根据实验室的测定,28 d 时,调整级配的模量值可达 2000 是规范级配模量值的 1.5 倍多。

### 4.2 两种级配用作路面结构基层时面板的力学分析比较

参照路面结构示意图 1,设定级配 I 用作基层时,厚度为 25 cm,级配 II 用作基层时,厚度为 30 cm,其它参数不变,按照上述 1、2、3 点所述的方法对两者进行力学分析比较,结果见下表 3。

表 3 两种级配不同厚度下的面板力学性能比较

	板厚(cm)	挠度(mm)	应力(MPa)	疲劳寿命(10 <sup>6</sup> )
级配 I	25	0.1596	2.051	1.59
级配 II	30	0.1449	2.0	5.47

从表 4 可以发现,级配 II 用作基层时的板中最大应力及板中挠度明显小于级配 I 时的应力及挠度,同时也可以看到级配 I 的疲劳寿命明显低于级配 II 的疲劳寿命。

表 4 级配组成及各自的模量值

筛径	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075	模量值(7d)
规范选取级配 I	100	95	80.5	57	39	26	15	3.5	1100(MPa)
调整后级配 II	100	85	77.7	51.2	28.8	25.3	8.2	0	1600(MPa)

## 5 结论

(1)水泥混凝土路面中,基层的模量及厚度的变化也极大地影响了路面的使用性能,Westergaard 推导得出的面板在半径为  $a$  的圆形荷载作用下的挠度及板中最大应力的公式表明,板中最大应力及板中挠度随着基层厚度及模量的增加而减小。

(2)基层模量及厚度的变化也影响着路面板在温度及荷载作用下的疲劳使用寿命,分析结果表明,基层模量的增大及厚度的增加可以明显延长面板的疲劳使用寿命。

(3)参照骨架密实结构的级配原则对基层级配进行调整,并与选取的规范级配进行比较,实验结果表明骨架密实结构级配的 7d 模量大于规范选取级配的 7d 模量,进一步的计算论证了高模量、厚基层的水泥混凝土路面各项力学性能均优于低模量、薄基层的水泥混凝土路面。



# 机场复合道面 PCN 计算方法分析

赵忠进<sup>1</sup>,袁捷<sup>2</sup>,周正峰<sup>2</sup>

(1.民航青岛流亭机场,山东青岛 266108;2.同济大学,上海市 200092)

**摘要:**道面等级号(PCN)作为机场道面的主要技术参数,需要机场当局向外公布,随着我国旧机场道面补强工程的实施,如何计算复合道面的 PCN 是机场当局普遍面临的一个技术问题。该文以我国东部某国际机场跑道加铺工程作为实例,对复合道面 PCN 计算方法的选择、计算参数的选取、以及 PCN 的计算过程进行了详细的分析,对于类似工程道面 PCN 的计算具有一定的参考价值。  
**关键词:**复合道面;PCN;计算方法  
**中图分类号:**U416.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)06-0019-03

## 0 前言

为了评价机场道面结构对于飞机荷载的适应性,世界各国曾提出很多道面强度的报告方法<sup>[1]</sup>,例如二战及二战以后的一段时间,英国把机场道面按其适用的机种来分类,如用“战斗机”、“轰炸机”、“重轰炸机”和“超重轰炸机”来划分等级;我国民航及前苏联民航曾采用飞机总质量或一个主起落架上的质量划分道面等级;此外还有采用在现有道面上运行飞机的荷载等级来评价道面适应性的方法,如当量单轮荷载(*ESWL*)法、荷载等级号码(*LCN*)法。这些方法各自有所侧重,但是由于没有从飞机荷载与道面结构之间相互响应的角度进行分析,所以无法准确地反映道面结构对于飞机荷载的适应程度。为了克服上述几种评价方法的缺陷,同时也为了方便国际间的交流,国际民航组织(ICAO)提出了 *ACN-PCN* 评价法<sup>[2]</sup>,并在会员国间推广。我国作为会员国,也采用了该方法作为道面强度的报告。在国际民航组织提出的机场道面强度 *PCN* 的计算方法中,将道面划分为两种类型,即刚性道面和柔性道面,对于民用机场复合式的道面结构,在计算 *PCN* 值时,究竟是将其视为刚性道面还是柔性道面,我国和国际民航组织的相关技术标准目前都没有明确规定。而我国大量使用年代久远的老机场,都面临道面结构补强的

客观需要,在道面实施加铺工程后,如何计算复合道面的 *PCN*,是我国各机场当局在公布道面 *PCN* 时面临的一个技术问题。本文结合我国东部某国际机场跑道沥青混凝土加铺工程的实例,对机场复合道面 *PCN* 的计算方法、参数取值等问题进行了深入的分析,计算结果获得了机场当局的认可,为类似工程中提供了技术参考。

## 1 PCN 的基本概念

*PCN* (*Pavement Classification Number*) 是道面等级号,表示道面承载强度的一个数值,这个数值是道面可以安全承受的当量单轮荷载 (*ESWL* 以吨计) 的 2 倍。对于供最大机坪重大于 5 700 kg 飞机使用的道面,*PCN* 应采用表 1 所示的格式,在道面强度报告中,除了通报 *PCN* 值外,还应给出道面类型、地基的强度、允许的轮胎压力和评价方法的相应代码。

表 1 PCN 代码表									
道面类型		地基强度		轮胎压力		评定方法			
PCN		地基反		CBR(沥					
代码	类型	代码	等级	青混	等级	胎压	代码	方法	
				凝土		MPa			
				道面)					
				MN/m <sup>3</sup>					
数值	A	高	≥120	≥13	W	高	无限制		
	R	刚性	B 中	60~120	8~13	X	中	1.0~1.5	T 技术
	F	柔性	C 低	25~60	4~8	Y	低	0.5~1.0	U 经验
		D	极低	<25	<4	Z	极低	<0.5	

## 2 PCN 的计算方法<sup>[3]</sup>

收稿日期:2006-07-30  
作者简介:赵忠进(1969-),男,山东胶南市人,工程师,从事场道设施管理工作。

参考文献

[1]JTG D400-2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S].

[2](美)黄仰贤.余定选,齐诚译.路面分析与设计[M].人民交通出版社,1998.

[3]JTJ 014-97 公路沥青路面设计规范[S].

[4]Yahia A. Abdel-Jawad,Waddah Salman Abdullah.Design of maximum density aggregate grading[J].Construction and Building Materials,2002(16):495-508.

[5]蒋应军.水泥稳定碎石基层收缩裂缝防治研究[D].长安大学硕士学位论文.18-26.

[6]李小重.水泥稳定碎石基层的级配优化[J].中外公路,2005,25(4).

[7]JTJ 058-2000 公路工程集料试验规程[S].