

# 具有碎石基层的半刚性沥青路面合理结构研究

## Study on semi-rigid pavement structure with granular base

何兆益 沈颖 黄卫 邓学钧  
(重庆交通学院路工系, 400074) (东南大学交通学院, 南京, 210096)

**文 摘** 本文在充分考虑碎石基层非线性特性的基础上, 采用弹性多层体系迭代方法全面分析了具有碎石上基层的半刚性沥青路面路表弯沉、面层底面及半刚性基层底面弯拉应力, 建立了路面结构层厚度与路面抗疲劳寿命的关系, 并在此基础上提出了适应于重交通道路的碎石基层半刚性沥青路面合理结构。

**关键词** 碎石基层, 非线性, 半刚性路面, 疲劳寿命。

**中图法分类号** TU 416.01

**作者简介** 何兆益, 男, 1965 年生, 副教授。1997 年获东南大学公路、城市道路与机场工程博士学位, 主要研究领域为路基、路面材料及结构综合分析。近年参与部、省级科研项目 4 项, 发表学术论文近 20 篇。

*He Zhaoyi Shen Ying Huang Wei Deng Xuejun*

(Chongqing jiaotong institute, 400074) (Institute of transportation engineering, Southeast university, Nanjing, 210096)

**Abstract** In the paper, based on the nonlinear property of granular base, the superposition method of multilayer elastic system analysis is employed to analyse surface deflection, flexural tensile stress at the bottom of asphalt surface layer and semi-rigid base course. Simultaneously, the relationship between thickness and fatigue life of pavement is established. Eventually, the thickness of semi-rigid pavement with granular base, which is suitable for heavy traffic and shows excellent performance of resistance to fatigue, is proposed.

**Key words** granular base, nonlinear, semi-rigid pavement, fatigue life.

## 1 前 言

采用高质量、密级配碎石作为传统半刚性沥青路面的上基层是防止和减少半刚性基层反射裂缝的有效途径。但是, 具有碎石基层的半刚性沥青路面(倒装结构)能否较好地适应重交通对路面结构抗疲劳性能的要求, 仍是人们关注的重点, 也是这种结构能否正常发挥防裂和止裂功能的关键。为此, 本文在充分考虑碎石基层非线性特性的基础上, 运用弹性多层体系迭代方法, 全面、系统地具有碎石基层的半刚性沥青路面结构进行分析, 从而提出适宜于重交通道路的合理路面结构。

## 2 碎石基层非线性特性

碎石基层材料通常具有较明显的非线性, 其非线性主要表现为弹性模量依赖应力状态而变, 通常用以下模型表示:

$$E = K_1 \theta^{K_2} \quad (1)$$

式中  $E$  是碎石基层弹性模量(kPa);  $\theta$  是第一应力不变量( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ );  $K_1, K_2$  是与材料和实验有关的回归系数。

碎石基层弹性模量通常采用室内重复动三轴试验

确定。研究表明<sup>[1,2]</sup>, 碎石基层弹性模量除主要受应力状态影响外, 还与碎石材料种类、级配等有关。根据文献[3]的研究, 对于高质量(石灰岩、玄武岩)密级配碎石基层,  $K_1$  变化于 16939~31925 间, 平均  $K_1$  为 24432;  $K_2$  变化于 0.40~0.53, 平均  $K_2$  为 0.47(单位 kPa), 若以 MPa 为单位, 则  $K_1$  为 628,  $K_2$  为 0.47, 分析时取  $K_1$  和  $K_2$ 。

## 3 具有碎石基层的半刚性沥青路面响应分析

### 3.1 计算模型及分析方法

采用如图 1 所示 4 层体系为分析对象, 其中上层为沥青面层  $E_1, h_1$ ; 中层为级配碎石上基层  $E_2 = K_1 \theta^{K_2}, h_2$ ; 下层为半刚性基层  $E_3, h_3$ ; 最下层为土基  $E_0, h_0$  外荷载为双圆  $p = 0.7\text{MPa}, \delta = 10.65\text{cm}$ 。弯沉计算点为轮隙表面点 1, 面层底面弯拉应力计算点为单轮中心轴上底面点 2, 半刚性基层弯拉应力计算点为双轮对称轴上底面点 3。

计算中, 各层材料参数均为定值, 级配碎石基层弹性模量取式(1)非线性模型,  $K_1 = 628, K_2 = 0.47$ (单

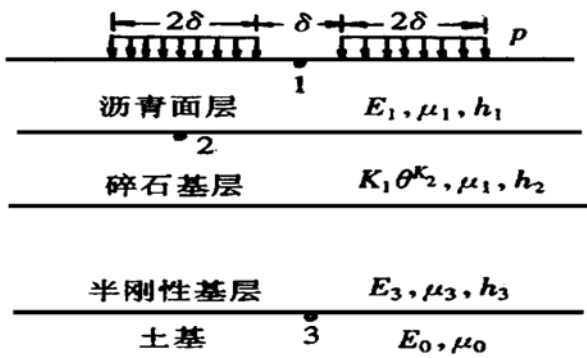


图1 计算简图

Fig. 1 Calculation diagram

位 MPa), 分析方法采用弹性层状体系理论迭代技术, 计算中先给碎石基层材料以初始模量, 计算出应力值后, 按式(1)求下一次迭代模量值, 直到前后两次模量相近( $\epsilon \leq 5\%$ )为止。计算框图见图2。

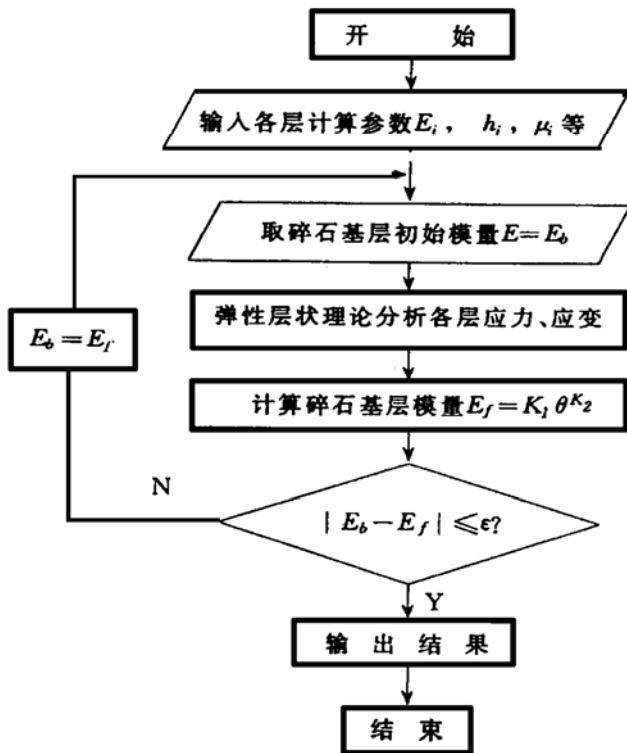


图2 计算框图

Fig. 2 Calculation block diagram

### 3.2 弯沉分析

图3, 图4为沥青面层厚度  $h_1 = 5 \sim 25\text{cm}$ , 碎石基层厚 10, 15, 20cm 情况下, 半刚性基层总厚  $h_3$  对弯沉的影响。计算参数取  $E_1 = 1500\text{MPa}$ ,  $E_2 = 628 \theta^{0.47}$ ,  $E_0/E_3 = 0.1$  ( $E_0 = 80\text{MPa}$ ), 计算采用弹性层状体系程序迭代。图中5组曲线分别为从上到下,  $h_1$  为 5, 10, 15, 20, 25cm 计算结果。

分析图3, 图4可得到如下结论:

(1) 不同碎石基层厚度 (10, 15, 20cm) 对  $h_3 < 40\text{cm}$  时弯沉有明显影响, 当  $h_3 \geq 40\text{cm}$  后, 碎石基层

厚度对弯沉几乎没影响。

(2) 就半刚性基层厚  $h_3$  影响而言,  $h_3 \geq 40\text{cm}$  时, 厚度对弯沉的影响远小于  $h_3 < 40\text{cm}$  情况。

(3)  $h_3 \geq 40\text{cm}$  后, 面层厚度  $h_1$  对弯沉无明显影响。

此外, 土基模量  $E_0$  也是影响路面结构整体强度和弯沉的重要因素。对  $E_1 = 1500\text{MPa}$ ,  $h_1 = 5\text{cm}$ ,  $E_2 = 628 \theta^{0.47}$ ,  $E_3 = 800\text{MPa}$ , 碎石基层厚 10, 15, 20cm, 半刚性基层厚  $h_3$  为 20~60cm 情况下, 土基模量  $E_0$  同路表弯沉关系的分析表明:

(1) 当  $h_3 \geq 40\text{cm}$  时, 碎石基层厚度对路表弯沉几乎没影响,  $h_3 < 40\text{cm}$  时, 碎石基层厚度对路表弯沉有明显影响。

(2) 土基模量  $E_0$  对路表弯沉有重要影响, 当  $E_0 \geq 80\text{MPa}$  后, 弯沉随土基模量增加而减小的趋势已远小于  $E_0 < 80\text{MPa}$  前情况。

(3) 半刚性基层厚度  $h_3 \geq 50\text{cm}$  后, 弯沉随  $h_3$  增加而减小的幅度已很小, 因此, 从经济出发,  $h_3$  以不超过 50cm 为宜。

综上所述, 从保证碎石基层半刚性沥青路面整体强度和较小而稳定的弯沉出发, 半刚性基层总厚  $h_3$  以取 40~50cm, 土基模量  $E_0$  以 80MPa 附近为宜。

### 3.3 沥青面层底面弯拉应力分析

通过对不同碎石基层厚度 (10, 15, 20cm) 下, 沥青面层模量变化于 1000~5000MPa 时, 沥青面层厚  $h_1$  对其底面弯拉应力  $\sigma$  的影响分析, 可得下述结论:

分析中, 半刚性基层厚  $h_3$  和土基模量取弯沉分析结果建议值 40cm 和 80MPa, 且  $E_0/E_3 = 0.1$ 。

(1) 沥青面层模量对面层底弯拉应力有很大影响, 模量越大, 拉应力越大。

(2) 面层模量较低时 (1000~2000MPa), 厚度  $h_1$  对面层底弯拉应力有较大影响, 但总趋势是, 当  $h_1 \geq 15\text{cm}$ , 尤其超过 20cm 后, 厚度影响已较小。

(3) 碎石基层厚度对面层弯拉应力影响不大, 尤其是  $h_1 \geq 10\text{cm}$  后。因此, 在此情况下碎石基层厚度主要决定于消减反射裂缝、排水等功能及施工要求。综合这些因素, 碎石基层厚取 12~15cm 是合适的。

### 3.4 半刚性基层底面弯拉应力分析

对碎石基层分别为 10, 15cm,  $E_1$  为 1500MPa,  $h_1$  为 15cm,  $E_2$  取  $628 \theta^{0.47}$ ,  $E_3$  取 800MPa, 土基模量  $E_0$  为 40~120MPa 情况下  $h_3$  对层底弯拉应力影响的分析表明

(1) 碎石基层厚度对半刚性基层弯拉应力影响较小,  $h_2$  从 10~15cm, 应力平均减少 0.01MPa, 尤其当  $h_3 > 40\text{cm}$  后, 碎石基层厚度影响趋于减小, 从减小层

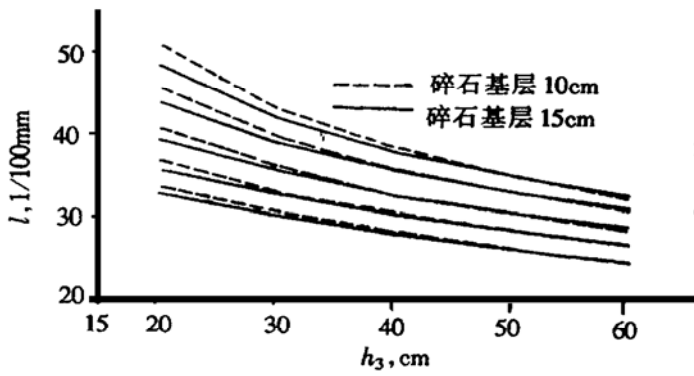


图 3 碎石基层 10, 15cm,  $h_3 - l$  关系

Fig. 3 The relationship between  $h_3$  and  $l$  with granular base thickness of 10, 15cm

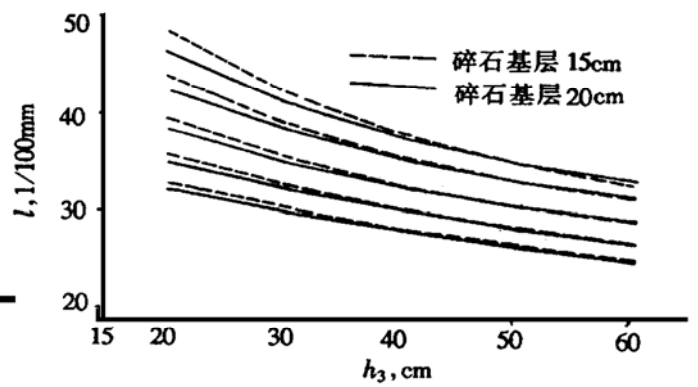


图 4 碎石基层 15, 20cm,  $h_3 - l$  关系

Fig. 4 The relationship between  $h_3$  and  $l$  with granular base thickness of 15, 20cm

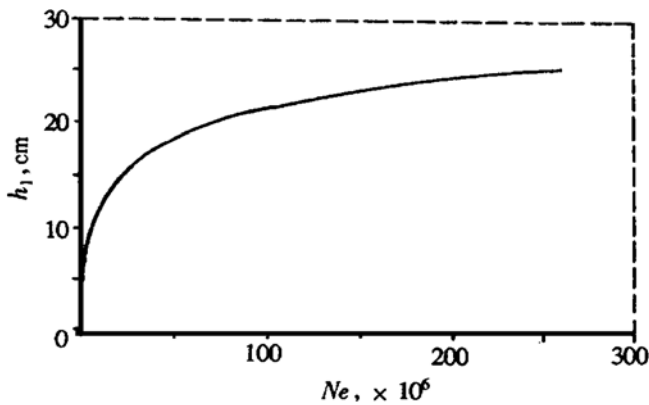


图 5 沥青面层厚  $h_1 - Ne$  关系

Fig. 5 The relationship between asphalt surface layer thickness  $h_1$  and  $N_e$

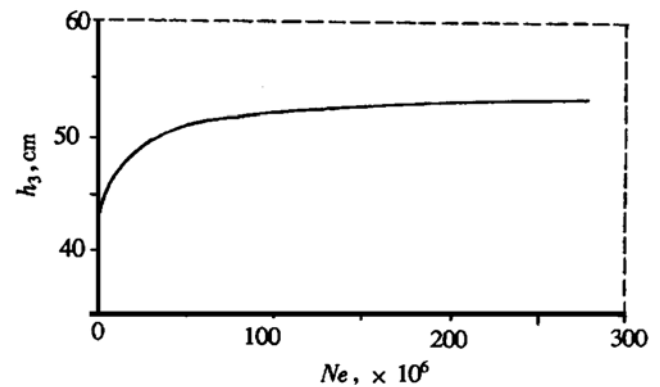


图 6 半刚性基层总厚  $h_3 - Ne$  关系

Fig. 6 The relationship between semi-rigid base course thickness  $h_3$  and  $N_e$

底应力出发,  $h_2$  以 15cm 为宜。

(2)  $h_3$  和  $E_0$  对半刚性基层弯拉应力有较大影响。随  $h_3$  和  $E_0$  的增加, 应力值减小, 但一定厚度和模量值 ( $h_3 \geq 40 \sim 50\text{cm}$ ,  $E_0 \geq 80\text{MPa}$ ) 后, 影响较前有所减小。

#### 4 路面结构厚度与疲劳寿命关系

对于沥青面层, 根据公路沥青路面设计规范<sup>[4]</sup>有

$$k_s = \frac{0.09A_a N_e^{0.22}}{A_c} \quad (2)$$

又 
$$k_s = \frac{s}{\sigma_R} \quad (3)$$

联立两式, 有 
$$\frac{s}{\sigma_R} = \frac{0.09A_a N_e^{0.22}}{A_c} \quad (4)$$

于是 
$$\sigma_R = \frac{s \cdot A_c N_e^{-0.22}}{0.09A_a} \quad (5)$$

若令 
$$\sigma_R = \sigma_m$$

则 
$$\sigma_m = \frac{s \cdot A_c N_e^{-0.22}}{0.09A_a} \quad (6)$$

式中  $s$  为沥青混凝土劈裂强度;  $A_c$  为公路等级系数;  $A_a$  为沥青混合料级配系数, 细、中粒式混凝土  $A_a$

取 1.0, 粗粒式混凝土  $A_a$  取 0.9;  $\sigma_m$ ,  $\sigma_R$  分别为沥青混凝土面层材料弯拉应力及容许弯拉应力;  $k_s$  为结构强度系数;  $N_e$  为标准轴载当量轴次。

15℃沥青混凝土劈裂强度, 根据交通部重点研究项目“沥青路面可靠度研究”河北试验路实测值, 并考虑变异性后, 建议取 0.75MPa。

这样如取  $A_c = 1$ ,  $A_a = 1$ , 则可建立沥青面层弯拉应力与其抗疲劳作用次数关系如下:

$$\sigma_m = 8.29 N_e^{-0.22} \quad (7)$$

对于碎石基层半刚性沥青路面结构, 当碎石基层厚  $h_2$  取 15cm, 半刚性基层总厚  $h_3$  取 40cm, 土基模量  $E_0 = 80\text{MPa}$ ,  $E_2 = 6280^{0.47}$ ,  $E_0/E_3 = 0.1$  时, 沥青面层厚度  $h_1$  与其抗疲劳次数 ( $BZZ - 100$ )  $N_e$  的关系如图 5 所示。

同样, 取  $h_1$  为 15cm,  $E_1 = 1500\text{MPa}$ ,  $h_2$  为 15cm,  $E_2 = 6280^{0.47}$ ,  $E_3 = 800\text{MPa}$ ,  $E_0 = 80\text{MPa}$  时, 半刚性基层总厚  $h_3$  与基层抗疲劳作用次数  $N_e$  关系如图 6。从图 5, 图 6 可得出

(1) 随着  $h_1$  增加, 其抗疲劳作用次数随之增加,

$h_1 = 15\text{cm}$  时,  $N_e$  为  $1.6 \times 10^7$  标准轴次;  $h_1 = 20\text{cm}$  时,  $N_e$  为  $7.0 \times 10^7$ , 故对高速公路和一级公路,  $h_1$  取 12~18cm 是合适的, 对特重交通高速公路,  $h_1$  可取 18~20cm。

(2) 当  $h_3 < 40\text{cm}$  时, 其抗疲劳性能较差, 但当  $h_3 > 40\text{cm}$  后, 抗疲劳性能迅速提高。

(3) 当  $h_3 > 50\text{cm}$  后, 随着  $h_3$  增加, 其抗疲劳性能提高较  $h_3 < 50\text{cm}$  前大得多, 显示出极好的疲劳特性。

## 5 结 论

通过弯沉、弯拉应力指标的综合分析, 可得如下结论:

(1) 具有高质量级配碎石上基层半刚性沥青路面, 不仅能较有效防止和减少半刚性路面反射裂缝, 只要结构组合合理, 它同时也具有适应重交通及良好抗疲劳能力。

(2) 综上分析, 建议路面结构如表 1 所示。

表 1 级配碎石基层沥青路面结构建议(一级、高速公路)

Table 1 Suggestion of asphalt pavement structure with granular base course (highway and freeway)

路面结构	交通量		
	$2.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7 \sim 7.0 \times 10^7$	$\geq 7.0 \times 10^7$
沥青面层厚度 (cm)	12~15	15~18	18~20
级配碎石上基层 (cm)	15	15	15
半刚性基层总厚 (cm)	40~45	45~50	$\geq 50$
土基模量 (MPa)	80		

## 参 考 文 献

- 1 Gonzalo Rada, Matthew W Witzak. Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular materials. TRR, 810: 100~105.
- 2 Mussarrat Zaman etc. Resilient moduli of granular materials. Journal of transportation engineering. 1996, 120: 93~98.
- 3 何兆益. 半刚性路面防止裂缝及其路用性能研究[博士学位论文]. 南京: 东南大学, 1997.

## 请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》是中国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术刊物, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的学术论文、研究报告、工程实录、学术讨论等稿件。报导新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。优先刊登国家自然科学基金等项目的重要研究成果以及来自工程实践的论文、报告等。

本刊获中国科协颁发的优秀期刊二等奖;

本刊获全国水利系统优秀期刊荣誉证书;

本刊获江苏省首届优秀期刊奖;

本刊于 1992 年、1996 年两次被确认为我国中文核心期刊;

本刊被《中国科学引文数据库》首批收录, 列全国被引频次最高的 500 期刊之一;

本刊被美国《工程索引》(Ei) 确认为 Ei Page One 数据库收

录期刊;

本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center (GE-IRC) 确认为岩土工程核心期刊。

本刊读者对象为从事土木建筑、水利水电、交通运输、矿山冶金、工程地质等部门的科研、教学及其他工程技术人员。

本刊为双月刊, 大 16 开本, 双栏排版, 120 页左右, 单月末出版。定价 10 元(邮购时每册另加邮费 1 元)。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548, 国内统一刊号 CN32-1124/TU, 国内发行代号 28-62, 国外发行代号 BM520。漏订或缺者请向编辑部邮购。

本刊还接待广告业务, 欢迎惠顾。

本刊地址: 南京虎踞关 34 号 邮编: 210024

(南京水利科学研究院土工所内)

电话: (025) 3739178-512 传真: (025) 3734321

《岩土工程学报》编辑部