

文章编号: 1002-0268 (2006) 06-0018-04

# 连续配筋混凝土路面横向裂缝 分布模型的研究

陈锋锋<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>, 秦永春<sup>2</sup>

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2 交通部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 连续配筋混凝土路面 (CRCP) 在我国有了一定的应用, 其设计还未完全采用基于可靠性理论的概率设计法。通过对我国早期的两条 CRCP 试验路调查, 运用可靠性理论与数理统计方法, 编制程序分析了横向裂缝间距、宽度的状况, 得出相应变异范围和概率分布模型, 为建立基于可靠性理论的连续配筋混凝土路面设计提供科学依据。研究结果表明: 横向裂缝间距的概率分布模型符合对数正态分布, 其变异范围为 0.500~0.932; 横向裂缝宽度的概率分布模型符合正态分布, 其变异范围为 0.202~0.384。

**关键词:** 连续配筋混凝土路面; 可靠性理论; 横向裂缝; 数理统计法

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

## Study on the Probability Distribution Model of Continuously Reinforced Concrete Pavement Transverse Cracks

CHEN Feng-feng<sup>1</sup>, HUANG Xiao-ming<sup>1</sup>, QIN Yong-chun<sup>2</sup>

(1. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China;

2. Research Institute of Highway, the Ministry of Communications, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Since Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP) has got some application in China, probabilistic design based on reliability theory has not been used completely in the design procedure. Based on the investigation of the two CRCP of the earlier period and the reliability theory and mathematical statistics methods, the authors analyze the transverse cracks interval and width. The research finds out the variation scope and the probability distribution model of cracks interval and width, so they can provide a scientific foundation for the CRCP design based on reliability theory. The results show that the probability distribution model of crack spacing is the Logarithm normal distribution model, the probability distribution model of crack width is the Normal distribution model, with the variation factor changing from 50.0% to 93.2% for the crack spacing data and from 20.2% to 38.4% for the crack width data.

**Key words:** Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP); reliability theory; transverse cracks; mathematical statistics methods

由于水泥混凝土等筑路材料的非均质性和施工偏差, 以及道路在使用期内的环境和荷载条件的变异, 使连续配筋混凝土路面 (CRCP) 结构的设计参数具有一定的不确定性。我国现行的 CRCP 中纵向钢筋配筋率设计是以混凝土面层横向裂缝的间距、宽度和钢筋拉应力为设计指标的定值设计法<sup>[1]</sup>, 缺乏参数变异

对路面结构影响的定量分析, 必然会给设计的结构带来不合理的偏差。

因此应该用概率方法对参数的变异性加以研究, 将确定型的设计改进为可靠性设计 (即设计方法由确定型向概率型转化), 将可靠度的概念引入到 CRCP 设计中来, 使设计方法更接近于实际情况。

收稿日期: 2005-03-14

作者简介: 陈锋锋 (1976-), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 从事路基路面研究. (cfdqd@126.com)

然而目前国内还没有对 CRCP 横向裂缝间距和宽度的概率模型进行系统的研究, 了解还很不够。本文依据可靠性理论并运用数理统计的方法, 依托我国早期的两条 CRCP 试验路况普查测定的大量数据, 编制程序对横向裂缝的统计特性进行了较全面的研究分析, 提出了相应的概率模型和变异范围, 为 CRCP 的可靠度设计打下了基础。

### 1 概率特性分析的原理

#### 1.1 统计分析

依据可靠性数学的基本理论、运用数理统计方法, 对采集的各单项参数进行统计分析。分析涉及到的基本统计特性参量有: 均值、标准差、变异系数、均值的标准误差、偏度和峰度等。本次理论分布函数选择了正态分布、均匀分布、指数分布、对数正态分布等, 模型中参数的估计采用极大似然法<sup>[2-3]</sup>, 采用的分布拟合检验方法是非参数检验中的卡方检验法和 K-S 检验法。分析中用到的具体数学形式和数学分析过程可参见相关书籍<sup>[4-7]</sup>, 此处不重复赘述。

#### 1.2 概率特性统计分析流程

为了适应确定各参数概率分布模型的要求, 分析时编制了同时适应大小子样的分布拟合优度检验电算程序, 采用的分布拟合检验方法是卡方检验法和 K-S 检验法, 根据样本的统计量来推断总体是否服从理论概率分布函数。统计分析的流程如图 1 所示。

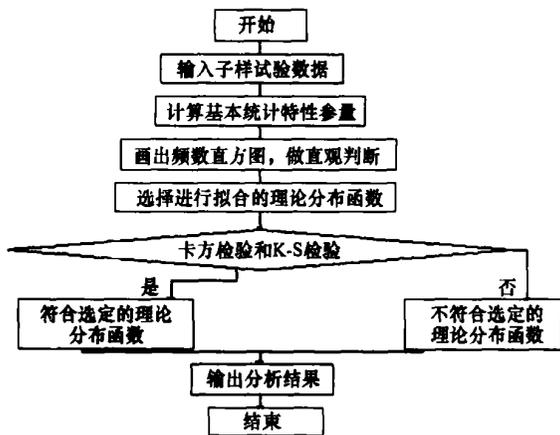


图 1 概率特性统计分析流程图

Fig 1 An flow graph of the probability characteristic analysis

## 2 CRCP 试验路概况和数据采集

1989 年 9 月, 在江苏省盐城东郊一级公路 3 期工程(OK+560~1K+060)铺筑我国第 1 条 CRCP 试验路。该试验路长 500 m, 2×3.5 m 两幅, 厚 0.2 m, 铺筑在 34 cm 厚的二灰土基层上; 采用配筋率为 0.64%, 选

用 Φ16 螺纹钢作为纵筋, 间距为 15.5 cm, 横向钢筋采用 Φ12 螺纹钢, 间距为 40 cm, 东半幅钢筋布置在板厚 1/2 处, 西半幅钢筋布置在板表面以下 7 cm。

1995 年 8 月, 在江苏省沿江新线工程镇江段铺筑了国内第 3 条 CRCP 试验路。该试验路宽 6 m, 分东、西两段铺筑在二灰碎石基层上, 西段为 K9+540~K10+040, 板厚为 20 cm, 配筋率 0.55%; 东段为 K10+040~K10+540, 板厚为 22 cm, 配筋率 0.5%。选用 Φ16 螺纹钢作为纵筋, 横向钢筋采用 Φ12 螺纹钢, 间距为 1 m。该试验路混凝土中添加了微膨胀剂。

盐城试验路于 1990 年 2 月进行了第 1 次测试<sup>[8]</sup>, 2004 年 10 月进行了第 2 次测试。镇江试验路于 1995 年 10 月进行了第 1 次测试<sup>[9]</sup>, 2004 年 10 月进行了第 2 次测试。调查项目为横向裂缝位置、数量、间距及其宽度。

### 3 裂缝间距和宽度的统计分析

将采集的数据进行统计分析, 得到横向裂缝间距和宽度的均值、标准差、变异系数等参数(见表 1、表 2)以及裂缝间距和宽度的频数直方图(限于本文篇幅, 只将部分直方图列出, 见图 2~图 9)。

表 1 试验段裂缝间距的描述统计量汇总

Tab 1 Crack spacing data

数据 来源	样本 数	均值 /m	标准 差/m	变异 系数	偏度	峰度	标准误差值		
							均值	偏度	峰度
Se1-1	144	2.978	1.654	0.555	0.888	0.570	0.138	0.202	0.401
Se1-2	225	2.210	1.482	0.671	1.447	2.373	0.099	0.162	0.323
Se2-1	154	2.842	2.148	0.756	1.814	5.264	0.173	0.195	0.389
Se2-2	332	1.385	1.290	0.932	3.738	22.045	0.071	0.134	0.267
Se3-1	80	5.169	3.606	0.698	1.771	3.782	0.403	0.269	0.532
Se3-2	122	2.725	1.836	0.674	1.168	1.206	0.166	0.219	0.435
Se4-1	86	5.814	3.417	0.588	1.913	4.279	0.368	0.260	0.514
Se4-2	137	3.418	1.709	0.500	1.179	1.636	0.146	0.207	0.411

表 2 试验段裂缝宽度的描述统计量汇总

Tab. 2 Crack width data

数据 来源	样本 数	均值 /cm	标准 差/cm	变异 系数	偏度	峰度	标准误差值		
							均值	偏度	峰度
Se1-1	76	0.429	0.159	0.371	0.882	1.315	0.018	0.276	0.545
Se1-2	93	0.684	0.138	0.202	0.124	0.255	0.014	0.250	0.495
Se2-1	64	0.389	0.121	0.311	0.216	-0.407	0.015	0.299	0.590
Se2-2	121	0.505	0.127	0.251	0.130	0.534	0.012	0.220	0.437
Se3-1	52	0.456	0.175	0.384	0.558	0.304	0.024	0.330	0.650
Se3-2	78	0.530	0.147	0.277	0.416	-0.118	0.017	0.272	0.538
Se4-1	57	0.477	0.170	0.356	0.501	0.340	0.023	0.316	0.623
Se4-2	60	0.627	0.160	0.255	0.973	1.715	0.021	0.309	0.608

注: Se1-1 为盐城试验路东幅 1990 年测试数据, Se1-2 为 2004 年数据; Se2-1 为盐城试验路西幅 1990 年测试数据; Se2-2 为 2004 年数据; Se3-1 为镇江试验路西段 1995 年测试数据, Se3-2 为 2004 年数据; Se4-1 为镇江试验路东段 1995 年测试数据, Se4-2 为 2004 年数据。

由表 1、表 2 可知, 对于横向裂缝间距, 其变异系数最大为 93.2%, 最小为 50.0%, 其平均值为 67.2%; 对于横向裂缝的宽度, 其变异系数最大为 38.4%, 最小为 20.2%, 其平均值为 30.1%。

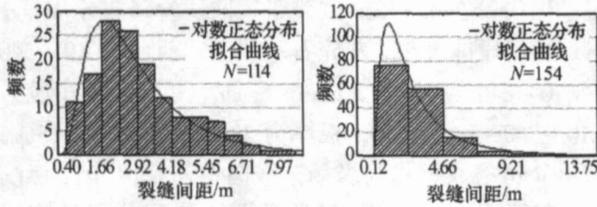


图 2 Se1-1 路段裂缝间距直方图

Fig 2 The crack spacing histogram of Se1-1

图 3 Se2-1 路段裂缝间距直方图

Fig 3 The crack spacing histogram of Se2-1

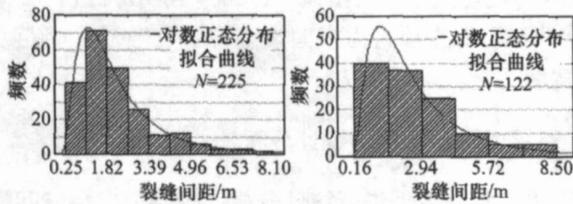


图 4 Se1-2 路段裂缝间距直方图

Fig 4 The crack spacing histogram of Se1-2

图 5 Se3-2 路段裂缝间距直方图

Fig 5 The crack spacing histogram of Se3-2

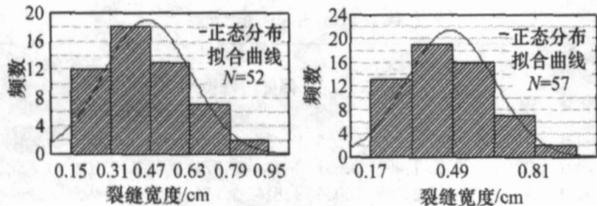


图 6 Se3-1 路段裂缝宽度直方图

Fig 6 The crack width histogram of Se3-1

图 7 Se4-1 路段裂缝宽度直方图

Fig 7 The crack width histogram of Se4-1

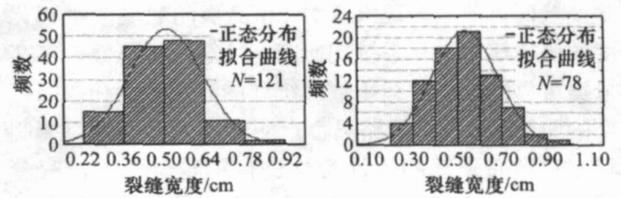


图 8 Se2-2 路段裂缝宽度直方图

Fig 8 The crack width histogram of Se2-2

图 9 Se3-2 路段裂缝宽度直方图

Fig 9 The crack width histogram of Se3-2

#### 4 裂缝间距分布函数模型的分析

对采集的裂缝间距进行概率分布模型的分析, 概率分布拟合模型的形式有: 正态分布、均匀分布、指数分布和对数正态分布。其详细的卡方检验和 K-S 检验的结果见表 3、表 4 (限于本文篇幅, 只将部分检验表格列出)。

通过卡方检验和 K-S 检验可知, 正态分布、均匀分布和指数分布模型的拟合计算中, 裂缝间距在卡方检验中的显著性概率均小于 0.05, K-S 检验中的双尾渐进显著性概率也均小于 0.05, 因此裂缝间距的概率分布模型不符合上述 3 种分布模型。

从表 3、表 4 可知, 对数正态分布模型的拟合计算中, 裂缝间距的对数在卡方检验中的显著性概率均大于 0.05, K-S 检验中的双尾渐进显著性概率也均大于 0.05, 因此裂缝间距的概率分布模型符合对数正态分布。

表 3 裂缝间距对数拟合正态分布卡方检验汇总

Tab. 3 Logarithm normal distribution result of chi-square test in crack spacing

数据来源	Se1-1	Se1-2	Se2-1	Se2-2	Se3-1	Se3-2	Se4-1	Se4-2
样本数	144	225	154	332	80	122	86	137
卡方值	4.965	3.073	9.046	6.254	3.219	6.924	4.260	8.576
自由度	4	5	6	5	4	4	4	4
显著性概率	0.291	0.689	0.171	0.282	0.522	0.140	0.372	0.073

表 4 裂缝间距对数拟合正态分布 K-S 检验

Tab. 4 Logarithm normal distribution result of Kolmogorov-Smirnov test in crack spacing

数据来源		Se1-1	Se1-2	Se2-1	Se2-2	Se3-1	Se3-2	Se4-1	Se4-2
样本数		144	225	154	332	80	122	86	137
正态分布参数	均值	0.9216	0.5727	0.7465	0.0307	1.4169	0.7561	1.6253	1.1014
	标准差	0.62435	0.69694	0.84996	0.76463	0.70821	0.76299	0.50728	0.53661
	绝对值	0.078	0.080	0.099	0.066	0.108	0.110	0.083	0.083
最大差值	最大正极端差	0.039	0.041	0.061	0.066	0.081	0.051	0.083	0.060
	最大负极端差	-0.078	-0.080	-0.099	-0.061	-0.108	-0.110	-0.065	-0.083
K-S 检验统计量 Z 值		0.942	1.203	1.234	1.210	0.964	1.216	0.770	0.966
双尾渐进显著性概率		0.338	0.110	0.095	0.107	0.311	0.104	0.594	0.308

## 5 裂缝宽度分布函数模型的分析

对采集的裂缝宽度进行概率分布模型的分析, 概率分布拟合模型的形式有: 正态分布、均匀分布和指数分布。其详细的卡方检验和 K-S 检验的结果见表 5、表 6 (限于本文篇幅, 只将部分检验表格列出)。

表 6 裂缝宽度拟合正态分布 K-S 检验

Tab. 6 The Normal distribution result of Kolmogorov-Smirnov test in crack width

数据来源		Se1-1	Se1-2	Se2-1	Se2-2	Se3-1	Se3-2	Se4-1	Se4-2
样本数		76	93	64	121	52	78	57	60
正态分布 参数	均值	0.4289	0.6839	0.3891	0.5046	0.4558	0.5301	0.4770	0.6267
	标准差	0.15901	0.13756	0.12100	0.12699	0.17480	0.14668	0.17046	0.15984
最大差值	绝对值	0.138	0.109	0.167	0.096	0.122	0.151	0.135	0.153
	最大正极端差	0.138	0.109	0.167	0.096	0.122	0.151	0.135	0.153
	最大负极端差	-0.090	-0.091	-0.161	-0.087	-0.102	-0.118	-0.115	-0.097
K-S 检验统计量 Z 值		1.203	1.054	1.337	1.061	.879	1.336	1.018	1.182
双尾渐进显著性概率		0.111	0.217	0.056	0.210	0.423	0.056	0.251	0.122

从表 5、表 6 可知, 正态分布模型的拟合计算中, 裂缝宽度在卡方检验中的显著性概率均大于 0.05, K-S 检验中的双尾渐进显著性概率也均大于 0.05, 因此各试验段裂缝宽度的概率分布模型符合正态分布。

通过卡方检验和 K-S 检验可知, 均匀分布和指数分布模型的拟合计算中, 试验段裂缝宽度在卡方检验中的显著性概率均小于 0.05, K-S 检验中的双尾渐进显著性概率也均小于 0.05, 因此各试验段裂缝宽度的概率分布模型不符合均匀分布、指数分布。

## 6 结语

通过对我国最早的盐城、镇江 CRCP 试验路的跟踪调查与观测, 收集了大量的横向裂缝间距、宽度等数据, 编制程序, 采用频数直方图以及非参数检验中的卡方检验和 K-S 检验, 对 CRCP 横向裂缝的间距和宽度概率分布模型进行了分析, 得到横向裂缝间距的概率分布模型符合对数正态分布, 其变异范围为 0.500~0.932; 横向裂缝宽度的概率分布模型符合正

表 5 裂缝宽度拟合正态分布卡方检验汇总

Tab. 5 The Normal distribution result of chi-square test in crack width

数据来源	Se1-1	Se1-2	Se2-1	Se2-2	Se3-1	Se3-2	Se4-1	Se4-2
样本数	76	93	64	121	52	78	57	60
卡方值	10.958	2.384	0.235	2.476	6.775	0.811	5.235	11.219
自由度	5	5	4	5	5	6	5	6
显著性概率	0.052	0.794	0.994	0.780	0.238	0.992	0.388	0.082

态分布, 其变异范围为 0.202~0.384, 为今后建立基于可靠性理论的 CRCP 设计方法奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] JTG D40-2002. 公路水泥混凝土路面设计规范 [S].
- [2] 耿素云, 张立昂. 概率统计 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.
- [3] 刘晓石, 陈鸿建, 等. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] M. 费史 (波兰). 概率论及数理统计 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1962.
- [5] 肖盛燮, 王平义, 等. 模糊数学在土木与水利工程中的应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 吴世伟. 结构可靠度分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [7] 中山大学数学力学系. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [8] 王小林. 连续配筋混凝土路面基本理论、试验和设计方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 1990.
- [9] 高俊启. 连续配筋混凝土路面裂缝的分析和研究 [D]. 南京: 东南大学, 2000.