

文章编号:1671-8879(2005)04-0013-04

## 聚丙烯酰胺改性混凝土的弯曲疲劳特性

孙增智<sup>1</sup>, 申爱琴<sup>1</sup>, 胡长顺<sup>1</sup>, 马铁民<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;  
2. 吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**通过强度试验, 冲击试验和弯曲疲劳试验, 研究了聚丙烯酰胺对混凝土桥面铺装层弯曲疲劳特性与韧性的改性效果, 建立了聚丙烯酰胺改性混凝土的弯曲疲劳寿命方程。结果表明, 聚丙烯酰胺对提高混凝土的抗折强度、弯曲疲劳特性、弯曲韧性和冲击韧性有显著作用, 并可降低压折比。

**关键词:**道路工程; 桥面铺装层; 聚丙烯酰胺; 弯曲疲劳特性; 弯曲韧性; 压折比

**中图分类号:**U414.18 **文献标识码:**A

### Flexural fatigue property of polyacryamide modified concrete

SUN Zeng-zhi<sup>1</sup>, SHEN Ai-qin<sup>1</sup>, HU Chang-shun<sup>1</sup>, MA Tie-min<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Jilin Communications Professional Technical College, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The modifying effects of polyacryamide on flexural fatigue property and flexural toughness of concrete bridge deck overlay is studied by strength test, impact test, flexural fatigue test and so on. The flexural fatigue life equation is established. The results show that polyacryamide can not only effectively enhances flexural strength, flexural fatigue property, flexural toughness and impingement toughness, but also decreases the ratio of compressive strength to flexural strength. 6 tabs, 3 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; bridge deck overlay; polyacryamide; flexural fatigue property; flexural toughness; ratio of compressive strength to flexural strength

## 0 引言

随着大交通量和重载现象的不断出现, 混凝土路面与桥面铺装病害日趋严重。由于桥面铺装层所处的特殊环境及其受力的复杂性, 因此它必须具备高强抗渗低收缩、耐冲击抗疲劳、层间粘结性能好、弯曲韧性好等性能。大量研究表明层间粘结不好、弯曲疲劳特性和弯曲韧性差是桥面铺装混凝土产生病害的主要原因<sup>[1,2]</sup>。目前, 在混凝土中加入少量

有机高分子聚合物, 成为对混凝土性能进行改良的 1 个新动向。在众多的水泥混凝土改性用聚合物中, 水溶性聚合物聚丙烯酰胺 (Polyacryamide, 简称 PAM) 因其优异的物理化学特性, 已在各行业中受到广泛应用, 但由于学科交叉, 有关 PAM 在混凝土中应用情况的系统报道很少<sup>[3,4]</sup>。本文对普通防水混凝土、掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土和 PAM 改性混凝土等几种复合材料进行了一系列的试验研究, 并对 PAM 改性混凝土的动载弯曲疲劳特性和

收稿日期: 2004-04-10

基金项目: 国家西部交通建设科技项目 (2002 ZB06)

作者简介: 孙增智 (1969-), 男, 陕西商州人, 长安大学实验师, 硕士研究生。

冲击性能进行了分析<sup>[5,6]</sup>。

## 1 原材料配比及试验方法

### 1.1 原材料

水泥:陕西耀县水泥厂的秦岭 425# 水泥。

砂:渭河水洗砂,表现密度  $2.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、自然堆积密度  $1.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、含泥量 0.8%,细度模数  $M_x=2.7$ 。

碎石:陕西临潼的人工轧制碎石,其中粒径 0.5~1.0 cm 的碎石占 30%,粒径 1~2 cm 碎石占 70%,级配良好。

外加剂:陕西恒升外加剂有限公司的 HSP 高效减水剂。

聚丙烯酰胺:山东聊城泰丰化工有限公司的板桥牌聚丙烯酰胺,其相对分子质量为  $6 \times 10^6$ ,为白色粉末状干粉。

### 1.2 配合比方案

按强度等级  $C_{40}$ 、坍落度 30~50 mm、砂率 39% 设计普通防水混凝土作为基准混凝土,HSP 高效减水剂的掺量采用水泥用量的 1%,PAM 按 PAM 改性水泥砂浆试验研究确定的掺量,即水泥用量 6%、8%、10% 的 3 种掺量加入基准混凝土中。具体配合比方案、坍落度测定见表 1。

表 1 PAM 改性混凝土配合比设计

编号	聚灰比 P/C/%	水灰比 W/C	质量比	坍落度/ mm
			水泥:砂:碎石:水:PAM	
C-1	0	0.420	1:1.42:2.23:0.420:0.00	47
H-1	1.0*	0.357	1:1.42:2.23:0.357:0.01*	43
P-1	6.0	0.420	1:1.42:2.23:0.420:0.06	32
P-2	8.0	0.404	1:1.42:2.23:0.404:0.08	20
P-3	10.0	0.389	1:1.42:2.23:0.389:0.10	11

注:\*为 HSP 高效减水剂的掺量

### 1.3 PAM 改性水泥混凝土的搅拌工艺

水泥混凝土搅拌机的转速比水泥净浆搅拌机慢很多(水泥混凝土搅拌机的转速为  $42 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,水泥净浆搅拌机低速自转为  $140 \pm 5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,高速自转为  $285 \pm 10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ),其搅拌剪切速率很低。当与基准混凝土搅拌相同时间(3 min)时,PAM 改性混凝土的流动性下降较大,坍落度损失较快,有假凝现象,给以外力震动或二次搅拌流动性有所恢复,且延长搅拌时间流动性逐渐改善。经反复试拌发现,搅拌 12 min 后 PAM 改性混凝土的流动性最好,外观感觉比基准混凝土还稀软,继续延长搅拌时间流动性无太大改善,因此确定 PAM 改性混凝土的搅

拌时间为 12 min。

由于 PAM 优异的胶粘性,导致混凝土稠度及粘聚性显著增加,即便是 PAM 改性混凝土的流动性较好,但因其粘性大,用坍落度法也无法测定其流动性,即使在坍落度筒内侧涂上润滑剂,也会出现部分粘筒的现象,从而使新拌混凝土体受到扰动导致测出的坍落度值失真(表 1 的坍落度值是在提筒过程中,用捣棒在坍落度筒两侧交替敲击各 5 下所测得的结果)。因此,用坍落度来评定其工作性不合适。振动法较为理想,虽然维勃稠度仪有振动,但其测试有提筒的程序。

### 1.4 试件的成型与养护

(1)试件成型。采用标准振动台振动成型,由于 PAM 改性混凝土的稠度及粘聚性较大,为保证试件成型质量,振动时间延长为 150~180 s,振动过程中用镩刀沿试模周边内侧插捣,振动至混凝土表面出现乳状水泥浆为止,刮去多余混凝土用镩刀初步抹平,收浆后用镩刀再次仔细抹平试件表面。

(2)试件养护。养护方式采用先标准湿养 14 d,再空气中干养 14 d。

### 1.5 试验方法

(1)抗压强度和抗折强度按照 JTJ053-94 规定的方法测定。

(2)弯曲疲劳试验方法。采用美国 MTS 公司生产的路面材料动态试验系统(MTS)进行弯曲疲劳试验,试件尺寸  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,标距 300 mm,试件龄期为 187~192 d,试验温度为室温( $18 \text{ }^\circ\text{C}$ )。采用应力控制模式按三分点加载,加载波形采用连续正弦波形,在试验中为加快进度,相邻波形间未插入间隙时间,本试验设置正弦波荷载的最小荷载为最大荷载的 10%,即高低应力比  $\rho = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} = 0.1$ ,加载频率选用 10 Hz。

(3)冲击试验方法。目前世界各国确定纤维增强混凝土冲击抗力的方法不尽一致,主要有爆炸试验、落锤试验、摆锤式撞击试验、旋转式撞击试验等测试方法。由于冲击弯曲与路面和桥面铺装层的受压状况比较接近,因此本文对混凝土的冲击特性测定采用落锤法测定其冲击弯曲性能。试件尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ ,支撑中心距为 450 mm,落锤采用土工重型击实锤,锤重为 4.5 kg,落高为 450 mm。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 抗折强度与抗压强度

抗折强度与抗压强度测定结果见表 2、图 1、图 2。

由表 1、表 2、图 1、图 2 试验结果表明:①掺入 1% HSP 后,混凝土的和易性明显变好,减水率达 15%。这是由于 HSP 掺入混凝土后,产生了吸附、分散、润湿和润滑的作用;②掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土的强度比普通防水混凝土有明显提高,同时 HSP 高效减水剂也使混凝土脆性降低,其压折比较普通防水混凝土降低 5.8%,说明 HSP 高效减水剂具有一定的降脆效果;③PAM 的加入导致新拌混凝土坍落度明显减少,且随着 PAM 掺量的增加流动性有下降的趋势,这主要是由于 PAM 优良的胶粘性,使混凝土稠度及粘聚性显著增加;④PAM 的加入导致混凝土抗压强度明显下降,但抗折强度均比普通防水混凝土显著提高。PAM 改性混凝土的脆性系数(压折比)比普通防水混凝土降低,且随着 PAM 掺量的增加而减少,这表明 PAM 的降脆增柔效果很好。

表 2 PAM 改性混凝土强度试验结果

编号	7 d			28 d		
	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	脆性系数	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	脆性系数
C-1	46.2	—	—	50.1	6.38	8.6
H-1	50.7	—	—	54.8	6.77	8.1
P-1	41.4	—	—	48.8	7.41	6.6
P-2	40.2	—	—	47.5	7.82	6.1
P-3	32.3	—	—	41.4	6.87	6.0

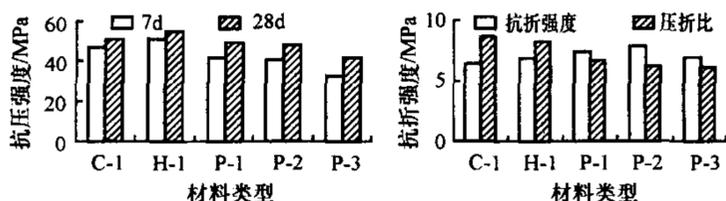


图 1 各类材料的抗压强度 图 2 各类材料的抗折强度

### 2.2 弯曲疲劳性能

大量研究证明,混凝土的疲劳寿命  $N$  服从 2 参数威布尔分布。目前,混凝土疲劳方程在工程应用中主要采用半对数疲劳方程,即威布尔分布存活概率为 50% 的  $S-N$  方程。但半对数疲劳方程只能在疲劳寿命的主要部分内使用,不能外延。但在实际工程中,往往需要了解低应力水平如  $S=0.5$  左右甚至更小时的疲劳寿命,这就需要将疲劳曲线沿  $S \rightarrow 0$  的方向外延。而双对数疲劳方程既能很好的拟合试验结果,又能外延。故本文混凝土弯曲疲劳方程采用双对数疲劳方程,即

$$\lg S = \lg a - b \lg N$$

式中: $S$  为应力比; $a$ 、 $b$  为回归参数; $N$  为疲劳次数。

选 H-1、P-2 做弯曲疲劳试验,试验结果见表 3。图 3 表示应力强度比与弯曲疲劳次数关系曲线。从试验结果可看出,PAM 改性混凝土的回归参数  $\lg a$

表 3 混凝土疲劳试验结果

类型	应力比	疲劳寿命/次	疲劳方程
掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土 (H-1)	0.65	113 292	$\lg S = 0.003 2 - 0.037 \lg N$ $R^2 = 0.9951$
	0.70	20289	
	0.75	3959	
	0.80	485	
	0.85	87	
PAM 改性混凝土 (P-2)	0.65	721236	$\lg S = 0.032 4 - 0.036 8 \lg N$ $R^2 = 0.995$
	0.70	168450	
	0.75	19872	
	0.80	3271	
	0.85	586	

成倍增长,其值为掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土的 10 倍多,说明 PAM 改性混凝土的弯曲疲劳性能大幅增强;同时 PAM 改性混凝土的回归参数  $b$  值稍低于掺 HSP

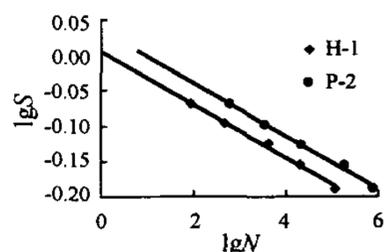


图 3 H-1 组和 P-2 组混凝土弯曲疲劳关系曲线

高效减水剂的防水混凝土,其值降低了 0.5%,说明 PAM 改性混凝土的疲劳曲线变缓,疲劳寿命随应力变化的敏感程度稍有减少。另外,通过建立的弯曲疲劳方程计算两种混凝土的理论疲劳寿命可以发现,在不同应力比下 PAM 改性混凝土的疲劳寿命均成倍的增长(表 4),其疲劳寿命是掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土的 6 倍多,即 PAM 改性混凝土具有优良的疲劳性能;从表 5 同样可看出,当  $N=2 \times 10^6$ ,PAM 改性混凝土的疲劳强度也有较大提高,其疲劳强度比掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土提高 23.6%。由此可见,PAM 改性混凝土的疲劳性能比掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土有很大提高,其对应力变化的敏感程度稍有降低。

表 4 混凝土理论弯曲疲劳寿命比较

应力比	理论疲劳寿命/次		P-2、H-1 的理论疲劳寿命比值
	H-1	P-2	
0.85	99	628	6.34
0.80	508	3 264	6.43
0.75	2 906	18 858	6.49
0.70	18 749	122 949	6.56
0.65	138 987	921 108	6.63

表 5  $N=2 \times 10^6$  时混凝土理论弯曲疲劳强度

混凝土类型	应力比	弯曲疲劳强度/MPa
H-1	0.589	3.99
P-2	0.632	4.93

### 2.3 抗冲击特性

PAM 改性混凝土的冲击试验结果见表 6。由表 6 可知, PAM 改性混凝土的初裂次数和终裂次数均随着 PAM 掺量的增加而先增后减, 且其抗冲击性能比普通防水混凝土明显提高, 其中 P-2 组提高最大, 其初裂次数是普通防水混凝土的 4.3 倍, 终裂次数是其 4.25 倍,  $\Delta N$  是其 4 倍。

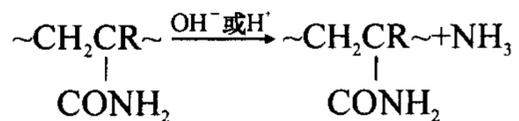
表 6 PAM 改性混凝土冲击试验结果

编号	初裂次数 $N_1$	终裂次数 $N_2$	$\Delta N$
C-1	7	8	1
H-1	18	20	2
P-1	21	23	2
P-2	30	34	4
P-3	16	18	2

### 3 机理分析

对 PAM 改性混凝土路用性能的试验研究表明, PAM 的掺入虽然导致混凝土抗压强度下降, 但其他性能均有显著改善, 其中抗折强度提高 22.6%, 压折比降低 24%, 尤其是其疲劳寿命为掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土的 6 倍多, 疲劳强度提高了 23.6%。

PAM 具有优良的胶粘性能和絮凝性能。PAM 分子链上的侧基为活泼的酰胺基, 它能发生多种化学反应。当 PAM 掺入混凝土中后, 其酰胺基水解而转化为含有羧基的聚合物。其反应式为



水解 PAM 同溶液中的多种金属阳离子相互作用, 如在  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  的水泥浆体系中, 其相互作用通常导致生成粘稠的胶状颗粒。橡胶状颗粒密实填充于混凝土孔隙之中起到柔性填充和加筋的作用, 改善了水泥混凝土硬化体的物理组织结构, 缓解内应力, 减少微裂纹的产生, 从而增强了 PAM 改性混凝土的致密性, 大幅提高了 PAM 改性混凝土的柔韧性、抗折强度和动力学性能。

### 4 结 语

(1) PAM 的加入, 使混凝土抗压强度有所下降。但抗折强度比基准混凝土有很大增强, 说明混凝土的抗弯拉能力得到很大改善, PAM 最佳掺量为水泥用量的 8%。

(2) PAM 改性混凝土的脆性系数(压折比)比基准混凝土降低, 且随着 PAM 掺量的增加而减少。说明混凝土的脆性减小, 柔性增大, PAM 的降脆增柔效果良好。

(3) 掺 PAM 的混凝土具有优良的动载力学性能, 与掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土相比, PAM 改性混凝土的弯曲疲劳性能和抗冲击能力大幅增长。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张占军, 胡长顺. 设防水层混凝土桥面铺装剪应力计算与分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(2): 14-17.  
ZHANG Zhan-jun, HU Chang-shun. The shearing stress of concrete bridge decks with waterproof layer [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(2): 14-17.
- [2] 张占军, 胡长顺, 王秉纲. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 56-59.  
ZHANG Zhan-jun, HU Chang-shun, WANG Bing-gang. Research on the design method of asphalt concrete pavement for concrete bridge deck structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 56-59.
- [3] 王培铭, 许 琦, J Stark. 桥面用丁苯乳液改性水泥砂浆的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(1): 1-6.  
WANG Pei-ming, XU Qi, Stark J. Mechanical properties of styrene-butadiene emulsion modified cement mortar used for repair of bridge surface [J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(1): 1-6.
- [4] 黄从运, 王服人. 聚合物改性水泥混凝土[J]. 房材与应用, 2002, 30(5): 25-26.  
HUANG Cong-yun, WANG Fu-ren. Polymer modified cement concrete [J]. Housing Materials and Applications, 2002, 30(5): 25-26.
- [5] 丁庆军, 王发洲, 黄绍龙. 桥面铺装层材料设计[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 55-58.  
DING Qing-jun, WANG Fa-zhou, HUANG Shao-long. Material design of bridge pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(4): 55-58.
- [6] 倪富健, 郭咏梅, 曾兰英, 等. 聚丙烯腈纤维 SMA 路用性能[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 7-11.  
NI Fu-jian, GUO Yong-mei, ZENG Lan-ying, et al. Road performance of SMA mixture with PAN fiber composite [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 7-11.