

聚丙烯酰胺改性水泥混凝土

孙增智, 申爱琴, 胡长顺

(长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064)

摘 要: 研究了聚丙烯酰胺对水泥混凝土桥面铺装层路用性能的改性效果。结果表明: 聚丙烯酰胺对提高抗折强度、粘结强度、弯曲韧性和抗磨性有显著作用, 并可降低压折比、渗透性和收缩性。

关键词: 桥面铺装层; 聚丙烯酰胺; 粘结强度; 弯曲韧性; 压折比

随着大交通量和重载现象的增多, 路面和桥面铺装的破坏也日趋严重, 尤其是一些大桥桥面的早期破坏已引起交通部门的高度关注, 昂贵的维修加固费用已让交通管理部门不堪重负。研究和开发性能优异、经久耐用的桥面铺装材料, 具有极为重要的现实意义。

普通水泥混凝土具有抗拉强度低、极限应变小、弯曲韧性差、抗渗性差、脆性大和易开裂等缺点, 因而无法满足桥面铺装层的特殊需要。大量研究表明层间粘结不好、收缩性能和弯曲韧性差是桥面铺装水泥混凝土产生病害的主要原因^[1,2]。为克服这些缺陷, 人们一直在寻求改善水泥混凝土性能的途径。近年来, 在水泥混凝土中加入少量有机高分子聚合物, 成为对水泥混凝土性能进行改良的一个新动向。因为有机高分子聚合物的长分子链结构以及大分子中的键节或链段的自旋转性, 决定其具有与无机非金属材料不同的性质——弹性和塑性, 所以水泥混凝土中加入少量有机高分子聚合物, 既可以使混凝土获得高密实度, 又不至于使混凝土的脆性加大, 这样, 便可制得高强低脆的水泥混凝土, 从而进一步拓宽了水泥混凝土的使用领域。在众多的水泥混凝土改性用聚合物中, 水溶性聚合物丙烯酰胺 (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。但将 PAM 应用于水泥混凝土路面的并不多, 为了研究 PAM 对混凝土路用性能的改性效果, 本文采用聊城泰丰化工有限公司生产的板桥牌聚丙烯酰胺和陕西产的 HSP 高效减水剂分别配制 PAM 改性混凝土和防水混

凝土, 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, 并分析了 PAM 改性混凝土的抗压强度、抗折强度、层间粘结强度、抗磨性、抗渗性、收缩性能和弯曲韧性等性能与 PAM 掺量的关系。

1 原材料配比及试验方法

1.1 原材料

水泥: 采用陕西耀县水泥厂生产的秦岭 32.5 (R) 硅酸盐水泥, 其性能符合规范要求。

砂: 采用渭河水洗砂, 表观密度 2.68 g/cm^3 、自然堆积密度 1.41 g/cm^3 、含泥量 0.8% 、细度模数 $M_x = 2.7$ 。

碎石: 采用陕西临潼产的人工轧制碎石, 其中粒径 $0.5 \sim 1 \text{ cm}$ 的碎石占 30% , 粒径 $1 \sim 2 \text{ cm}$ 碎石占 70% , 级配良好。

外加剂: 采用陕西恒升外加剂有限公司产的 HSP 高效减水剂。

聚丙烯酰胺: 采用聊城泰丰化工有限公司生产的板桥牌聚丙烯酰胺, 其相对分子质量为 6×10^6 , 为白色粉末状干粉。

1.2 配合比方案

按强度等级 C45、坍落度 $30 \sim 50 \text{ mm}$ 和砂率 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 按水泥用量的 6% 、 8% 、 10% 等 3 种掺量加入基准混凝土中。具体配合比方案及坍落度测定结果见表 1。

表 1 PAM 改性混凝土的配合比设计

编号	聚灰比 $P/C(\%)$ [HSP 掺量 $(\%)$]	水灰比 W/C	减水率 $/\%$	质量比 水泥 : 砂 : 碎石 : 水 : PAM(HSP)	坍落度/mm
C_1	0	0.42	0	1 : 1.42 : 2.23 : 0.42 : 0.00	47
H_1	[1.0]	0.357	15	1 : 1.42 : 2.23 : 0.357 : (0.01)	43
P_1	6	0.42	0	1 : 1.42 : 2.23 : 0.42 : 0.06	32
P_2	8	0.404	3.7	1 : 1.42 : 2.23 : 0.404 : 0.08	20
P_3	10	0.389	7.3	1 : 1.42 : 2.23 : 0.389 : 0.10	11

1.3 PAM 改性水泥混凝土的搅拌工艺

由于水泥混凝土搅拌机的转速与水泥净浆搅拌机相比很慢(水泥混凝土搅拌机的转速为 42 r/min,而水泥净浆搅拌机低速自转为 140 r/min ± 5 r/min,高速自转为 285 r/min ± 10 r/min),因此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 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,再继续延长搅拌时间流动性无太大改善,因此决定 PAM 改性混凝土的搅拌时间采用 12 min。

由于 PAM 优异的胶粘性,导致水泥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坍落度值,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,开发简单实用而又经济可行的测试仪器是当务之急。

1.4 试验方法

(1)抗压强度、抗折强度、抗磨性、抗渗性和收缩性能均按照《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ 053—94)规定的方法测定。

(2)层间粘结强度试验方法。

层间粘结强度的测定目前还没有规定统一的方法,本文参考文献[5]的界面粘结强度测试原理,对 100 mm × 100 mm × 300 mm 的混凝土试模稍做处理,得一种不用专门加工仪器设备的简便易行之法。

该方法是:先浇注一条 100 mm × 100 mm × 300 mm 的混凝土试块(配合比 1 : 1.15 : 2.95, $W/C = 0.44$),在 20℃ ± 1℃ 的水中养护 28 d 后取出擦干,放置 4 h,用钢刷刷净试件表面,然后以试件成型时的侧面为粘结面竖直放入试模正中,两侧的试模底部分别垫上 100 mm × 100 mm × 5 mm 的钢板并涂刷脱模剂(如图 1),再分别浇注防水混凝土、纤维混凝土和聚合物混凝土等新材料,养护 28 d 后按图 2 所示垫上钢块,在 10 t 压力机上进行测试。按下式计算界面粘结强度:

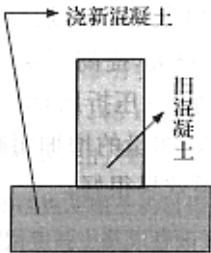


图 1 试件制备示意

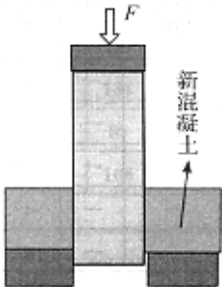


图 2 试件受力示意

$$f = F / (100 \times 95 \times 2) \tag{1}$$

式中: f 为界面粘结强度,MPa; F 为压力,N。

(3)弯曲韧性试验方法。

采用美国 MTS 公司生产的路面材料动态试验系统(MTS)跟踪试件的荷载~挠度曲线,用 $\delta_{ib} = L / 150$ 时,荷载~挠度曲线下包围的面积来表示初度。

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,由表1、表2、图3和图4试验结果表明:(1)掺入1%HSP 高效减水剂后,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、润湿和润滑的作用之故;(2)掺HSP 高效减水剂的防水混凝土的强度均比普通防水混凝土有明显提高,抗折强度28 d 提高6.1%,抗压强度7 d 提高9.7%,28 d 提高8.1%。这是由于HSP 高效减水剂的加入,使混凝土的水灰比下降,从而使水泥石内部孔隙率明显减少,结构更为致密,因而强度和耐磨性显著提高。同时,HSP 高效减水剂也使混凝土脆性降低,其压折比比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;(3)PAM 的加入导致新拌混凝土坍落度明显减少,且有随着PAM 掺量的增加流动性下降的趋势。这主要是由于PAM 优异的胶粘性,导致混凝土稠度及粘聚性显著增加的结果;(4)PAM 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,且随着PAM 掺量的增加而先增加后减少,其中 P_2 组提高幅度最大,提高幅度达22.6%。PAM 改性混凝土的脆性系数(压折比)均比普通防水混凝土降低,且随着PAM 掺量的增加而减少。这些都表明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	—	—	54.9	6.77	8.1
P_1	41.1	—	—	48.8	7.41	6.6
P_2	40.2	—	—	47.5	78.2	6.1
P_3	32.3	—	—	41.4	6.87	6.0

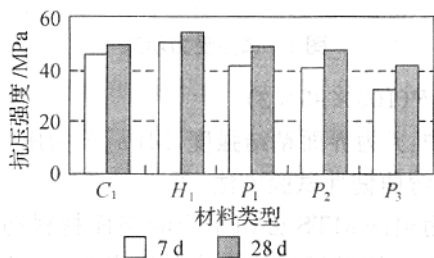


图3 各类材料的抗压强度

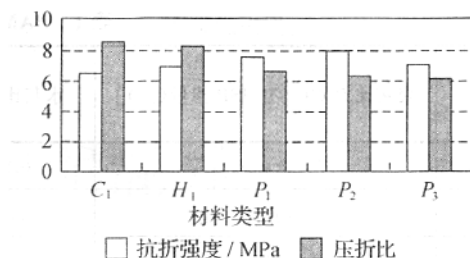


图4 各类材料的抗折强度

2.2 层间粘结性能

层间粘结强度试验结果见表3和图5,显然掺HSP 高效减水剂的防水混凝土和PAM 改性混凝土的层间粘结强度均比普通防水混凝土明显提高,其中掺HSP 高效减水剂的防水混凝土提高幅度达17.1%,其中 P_3 组提高幅度最大,提高近4倍。而且PAM 改性混凝土的层间粘结强度有随着PAM 掺量的增加而增加的发展趋势。这是由于PAM 超凡的胶粘性能和絮凝性能,导致混凝土的层间粘结强度提高的结果。

表3 PAM 改性混凝土层间粘结强度试验结果

编号	C_1	H_1	P_1	P_2	P_3
层间粘结强度/MPa	0.82	0.96	1.14	2.05	4.02

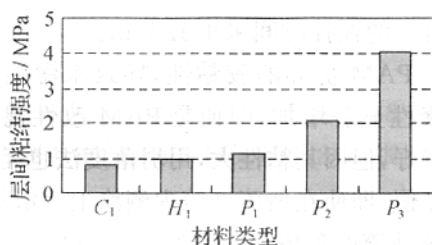


图5 各类材料的层间粘结强度

2.3 抗磨性与抗渗性

抗磨性与抗渗性试验结果见表4、图6和图7,试验结果表明:(1)掺HSP 高效减水剂的防水混凝土的抗磨性与抗渗性均比普通防水混凝土有所提高,其单位面积磨损量比普通防水混凝土减少7.6%,渗水高度比普通防水混凝土减少26.5%。这进一步证明HSP 高效减水剂的加入,使混凝土的结构更为致密,从而使混凝土的抗磨性与抗渗性提高;(2)PAM 改性混凝土的抗渗性均比普通防水混凝土显著提高,且随着PAM 掺量的增加而先增强后降低。其中 P_2 组提高幅度最大,其渗水高度降低91.2%。这充分表明,PAM 改性混凝土的抗渗性的提高,是由PAM 在混凝土中生成的橡胶状固体密实填充于混凝土孔隙之中,从而增强了PAM 改性混凝土的致密性。耐磨性试

验也进一步证明了这一点,PAM 改性混凝土的耐磨性均比普通防水混凝土有明显提高,其中 P_1 组提高幅度最大,其单位面积磨损量降低 21.4%。但 PAM 改性混凝土单位面积磨损量却随着 PAM 掺量的增加而增加。由此可见,从抗磨性与抗渗性综合考察聚丙烯酰胺的最佳掺量为 0.9 kg/m^3 。

表 4 PAM 改性混凝土耐磨性与抗渗性试验结果

编号	C_1	H_1	P_1	P_2	P_3
单位面积磨损量 kg/m ²	3.376	3.121	2.655	2.774	2.806
渗水高度/mm	34	25	6	3	18

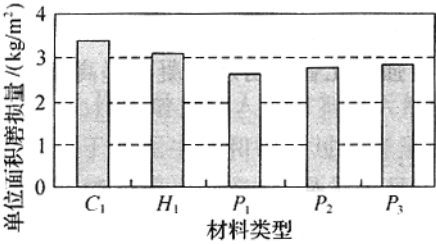


图 6 各类材料的抗磨性

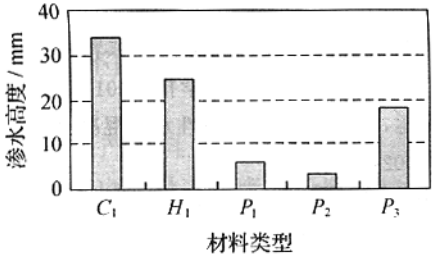


图 7 各类材料的抗渗性

2.4 弯曲韧性

弯曲韧性试验结果见表 5 与图 8,结果表明:掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土的弯曲韧性比普通防水混凝土有所提高,其韧度增加 34.6%,PAM 改性混凝土的弯曲韧性比普通防水混凝土明显提高,且随着 PAM 掺量的增加而先增加后减少。其中 P_2 组提高幅度最大,其韧性提高 169%。这充分说明 PAM 的加入,使混凝土的柔韧性得到明显改善。

表 5 PAM 改性混凝土弯曲韧性试验结果

编号	C_1	H_1	P_1	P_2	P_3
弯曲韧性/(N·M)	13	17.5	29.25	35	26.875
韧性指数/MPa	1.95	2.6	4.387 5	5.25	4.031 2

2.5 收缩性能

收缩测定结果见表 6 与图 9,结果表明:PAM 改

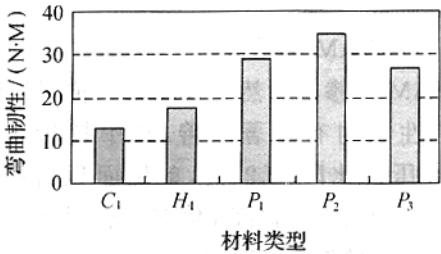


图 8 各类材料的弯曲韧性

性混凝土和掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土在各龄期的收缩率均比普通防水混凝土减小。普通防水混凝土 6 个月龄期的收缩率分别是其 14 d 龄期的 2.02 倍、28 d 龄期的 1.41 倍、45 d 龄期的 1.09 倍。掺 HSP 高效减水剂的防水混凝土 6 个月龄期的收缩率分别是其 14 d 龄期的 1.86 倍、28 d 龄期的 1.36 倍、45 d 龄期的 1.11 倍,说明 HSP 高效减水剂的加入,使混凝土结构更为致密,因而收缩性能得到改善。 P_1 组 PAM 改性混凝土 6 个月龄期的收缩率分别是其 14 d 龄期的 1.39 倍、28 d 龄期的 1.09 倍、45 d 龄期的 1.01 倍。 P_2 组 PAM 改性混凝土 6 个月龄期的收缩率分别是其 14 d 龄期的 1.33 倍、28 d 龄期的 0.91 倍、45 d 龄期的 1.01 倍。 P_3 组 PAM 改性混凝土 6 个月龄期的收缩率分别是其 14 d 龄期的 1.66 倍、28 d 龄期的 1.10 倍、45 d 龄期的 1.10 倍。可见 PAM 的加入,使混凝土的收缩性能得到较大改善。

表 6 PAM 改性混凝土的收缩率($\times 10^{-6}$)

编号	龄期/d								
	7	14	28	45	60	90	120	150	180
C_1	129	181	259	337	356	366	356	366	366
H_1	107	166	228	279	289	270	280	299	309
P_1	64	95	121	131	131	141	122	132	132
P_2	56	72	105	95	85	95	105	115	96
P_3	39	58	87	87	106	96	86	96	96

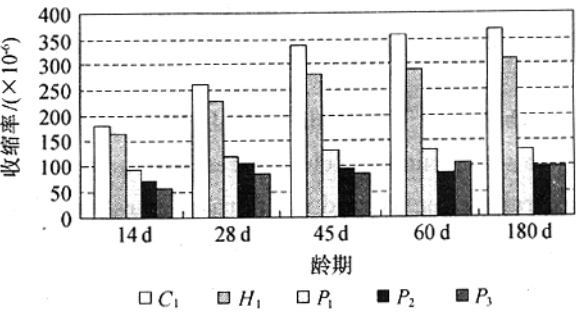
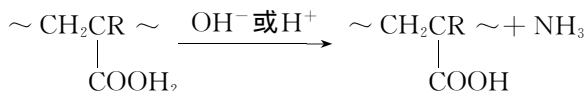


图 9 各类材料的收缩性能

3 机理分析

通过对 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%, 单位面积磨损量减少 17.8%, 抗冲击能力提高 3 倍多。各龄期收缩均大幅减少, 尤其是抗渗性、弯曲韧性和层间粘结强度提高显著。渗水高度只有基准混凝土的 1/11, 弯曲韧性提高 169%, 层间粘结强度提高 150%。

这与 PAM 超凡的胶粘性能和絮凝性能是分不开的。PAM 分子链上的侧基为活泼的酰氨基, 它能发生多种化学反应。当 PAM 掺入混凝土中后, 其酰氨基水解而转化为含有羧基的聚合物。这种聚合物和丙烯酸胺—丙烯酸纳共聚物的结构相似。所得产品叫部分水解的聚丙烯酰胺。其反应式如下:



水解 PAM 会同溶液中的多种金属阳离子相互作用, 如在含多价离子 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 的水泥浆体系中, 这些相互作用通常导致生成粘稠的凝胶, 从胶状颗粒到均匀橡胶状固体, 橡胶状固体密实填充于混凝土孔隙之中起到一个柔性填充和柔性加筋的作用, 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, 在宏观上就表现为 PAM 改性混凝土的柔韧性、抗渗性、粘结强度、抗折强度和收缩性能的大幅提高。

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、层间粘结强度、耐久性和弯曲韧性均比基准混凝土有大幅增强, 说明混凝土的抗弯拉能力、粘结性能、耐久性和弯曲韧性均得到大幅改善。综合各性能测定结果可得 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)和收缩率均被基准混凝土降低, 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 的降脆限缩效果良好。

(3) 更为突出的是掺 PAM 的混凝土, 其抗渗性和层间粘结强度成倍增长, 抗渗性提高幅度高达 91.2%, 层间粘结强度比普通防水混凝土提高近 4 倍。

参考文献:

- [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(20).
- [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).
- [3] 王培铭, 许绮, Stark J. 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).
- [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).
- [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).
- [6] JTJ 053-94, 公路工程水泥混凝土试验规程[S].

A Study on Road Performance of Polacrylamide Modifying Concrete Used for Bridge Deck Overlay

SUN Zeng-zhi, SHEN Ai-qin, HU Chang-shun

(The Key Laboratory for Special Area Highway Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The modifying effects of polyacrylamide on road performance of cement concrete bridge deck overlay are studied. Relevant test and analysis show that polyacrylamide can not only effectively enhances flexural strength, bond strength, flexural toughness and abrasion resistance, but also decreases the ratio of compressive strength to flexural strength, permeability and shrinkage.

Key words: bridge deck overlay; polyacrylamide; bond strength; flexural toughness; the ratio of compressive strength to flexural strength