

文章编号: 1002-0268 (2003) 06-0008-05

UTW 路面用混凝土试验研究

马¹, 胡长顺¹, 路学敏², 李成才²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省铜川公路管理局, 陕西 铜川 727000)

摘要: 对普通混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和网状聚丙烯纤维混凝土进行强度性能和疲劳性能的室内对比试验, 结果表明: 钢纤维和 Fibemesh 网状聚丙烯纤维对混凝土抗弯拉强度改善明显; 掺入三种纤维后提高了混凝土的柔韧性, 尤其是网状聚丙烯纤维和单丝纤维, 改善效果很明显, 这对改善 UTW 路面应力状况非常有利; 网状聚丙烯纤维混凝土在 0.65~0.90 应力水平范围内, 疲劳寿命增长均很明显, 而且相对比较稳定, 说明网状聚丙烯纤维的增韧作用更加明显, 适宜于 UTW 路面使用。

关键词: 超薄水泥混凝土; 纤维增强混凝土; 强度性能; 柔韧性; 疲劳性能

中图分类号: U414.1*8

文献标识码: A

Experimental Study of Concrete for Ultra-thin Whitetopping Pavement

MA Biao¹, HU Chang-shun¹, LUXue-min², LI Cheng-cai²

(1. School of Highway, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China;

2. Tongchuan Highway Management Bureau of Shaanxi P. R., Shaanxi Tongchuan 727000, China)

Abstract: Indoor experiments of strength and fatigue performance are conducted to compare three types of fiber reinforced concretes with ordinary cement concrete. Some results are brought forward. Flexural tensile strength of concrete is evidently improved by the steel fiber and the mesh polypropylene fiber. Mixing three types fibers into the concrete can increase the flexibility of the concrete, especially two types of polypropylene fibers, mesh and monofilament. It is of great benefit to improve the stress condition of UTW. The fatigue life of the mesh polypropylene fiber reinforced concrete increase evidently and steadily within the range of stress ratio between 0.65 and 0.90. This indicates that the mesh polypropylene fiber have more effects on increasing the flexibility of the concrete, and can be used to UTW pavement.

Key words: Ultra-thin whitetopping; Fiber reinforced concrete; Strength performance; Flexibility; Fatigue performance

超薄水泥混凝土 (Ultra-Thin Whitetopping, 简称 UTW) 路面作为一种新型的旧沥青路面维修技术, 由于其厚度薄 (5~10cm)、板块尺寸小 (0.6~2.0m), 使用性状介于刚性路面和柔性路面之间。1991 年诞生后, 美国 30 多个州先后修筑了大量试验工程研究其使用性能^[1,2,4], 国内目前仅有本课题对其修筑技术进行了研究。国外试验路研究中使用了普通混凝土和纤维增强混凝土 (主要是聚丙烯纤维), 仅根据使用状况观测结果建议使用纤维增强混凝土。本课题通过室内试验研究, 对比分析普通水泥混凝土和三种纤维

增强混凝土的强度性能和疲劳性能, 确定适宜于 UTW 路面使用的水泥混凝土增强纤维和配合比组成, 为 UTW 路面设计理论与方法研究提供设计参数依据, 也为 UTW 路面施工技术研究提供施工依据。

1 原材料

1.1 水泥

试验用水泥选用陕西铜川新川牌 425# 普通硅酸盐水泥, 物理、力学性质试验见表 1。

1.2 集料

收稿日期: 2002-10-24

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2001C02)

作者简介: 马 (1972-), 男, 甘肃会宁人, 长安大学公路学院讲师, 工学博士, 从事路面工程研究。

试验用细集料采用灞河中砂，粗集料为铜川石灰 20mm) 和 II (5~ 10mm) 两种轧制碎石掺配而成。集料性质试验结果见表 2~ 表 4。

水泥物理、力学性质试验结果 表 1

试验项目	标准稠度含水量 (%)	细度 (%)	凝结时间		安定性	水泥胶砂强度 (MPa)			
			初凝	终凝		抗折		抗压	
						3d	28d	3d	28d
试验结果	6.5	5.4	3h09m	4h05m	合格	3.75	6.32	24.0	35.7

集料级配组成 表 2

筛孔尺寸 (mm)	25	20	16	10	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.075
通过率 (%)	100	100	100	95.7	89.7	81.7	63.5	21.0	6.1	0	0
粗集料	97.2	80.1	62.8	32.5	0						

粗集料试验结果 表 3

试验项目	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	堆积密度 (g/cm ³)	压碎值 (%)	针片状颗粒含量 (%)	
					I	II
试验结果	2.71	0.5	1.48	11.6	4.2	4.0

细集料试验结果 表 4

试验项目	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	含泥量 (%)	堆积密度 (g/cm ³)	细度模数
试验结果	2.63	2.5	1.1	1.42	2.2

1.3 外加剂

外加剂采用西安中融建材化工有限责任公司生产的 N(R) 早强高效减水剂, 掺量为 2% (水泥用量)。

比为 30, 密度为 7.8g/cm³, 掺量为 1%。网状聚丙烯纤维采用美国生产的 Fibemesh 网状聚丙烯纤维, 其物化特性如表 5 所示, 标准掺量为 0.9kg/m³。

1.4 增强纤维

本试验选用了 3 种纤维进行对比分析试验。钢纤维采用浙江嘉兴纵横牌异形钢纤维, 长 30mm, 纵横

单丝聚丙烯纤维采用由 Hoechst AG 公司开发的专用于水泥混凝土加筋的德兰尼特 (Dolanit 18) 人造短纤维, 掺量为 3kg/m³, 其技术特征见表 6。

Fibemesh 网状聚丙烯纤维物化特性 表 5

吸水性	张力强度	熔点	导热性	酸和盐阻抗	杨氏弹性系数	比重	纤维长度	燃点	导电性	碱阻抗
无	80~ 100ksi	160~ 170℃	低	高	3.5kN/m ²	0.91	12~ 51mm	590℃	低	碱防护

Dolanit 18 人造短纤维技术特征 表 6

长度 (mm)	横断面	光泽度	密度 (g/cm ³)	延伸率 (%)	强度 (MPa)	抗酸性	抗碱性	耐温性	抗水解性	含水率 (%)
12	肾形	淡黄色	1.18	14~ 20	330~ 413	良好	良好	良好	良好	≤2

2 混凝土配合比

美国 UTW 路面试验工程典型混凝土配合比 表 7

美国 UTW 路面试验工程采用的典型混凝土配合比见表 7。

水泥 (ASTM C 150, TYPE 1)	440~ 480kg/m ³
碎石 (# 8, 20mm)	1050~ 1100 kg/m ³
砂	600~ 700 kg/m ³
水灰比	0.33~ 0.39
含气量	4%~ 6% (1.6%~ 2.5%)
聚丙烯纤维	1.8 kg/m ³
高效减水剂 (HRWR)	3550~ 4000ml/m ³
引气剂	200~ 600 ml/m ³
坍落度	设计为 78mm, 掺入 HRWR 前 60~ 90 mm
设计弯拉强度	4 MPa
设计抗压强度	27~ 50 MPa
单位重量	2300 kg/m ³

本课题根据试验目标、原材料性质及施工要求, 拟设计普通混凝土、钢纤维混凝土、网状聚丙烯纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土进行对比分析。普通水泥混凝土配合比设计采用以抗弯拉强度为指标的经验公式法确定初步配合比, 进行试拌调整得到基准配合比。纤维混凝土为在基准配合比中掺入不同剂量的各种纤维形成。每立方米混凝土中各材料用量见表 8。

试验混凝土配合比 (kg/m³)

表 8

类 型	水泥	砂	碎石	水	外加剂	钢纤维	Fibermesh	Dolanit	坍落度 (mm)
普通混凝土	416	655	1248	146	8 32	0	0	0	21
钢纤维混凝土	416	655	1248	146	8 32	78	0	0	12
纤维网混凝土	416	655	1248	146	8 32	0	0.9	0	17
纤维混凝土	416	655	1248	146	8 32	0	0	3	9

3 强度性能试验分析

强度性能试验按照《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ 053-94) 规定方法进行。试验结果见表 9、图 1 和图 2。

强度性能试验结果 表 9

混凝土类型	抗弯拉强度 (MPa)		抗压强度 (MPa)		抗弯拉弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)
	7d	28d	7d	28d	
普通混凝土	5.58	6.18	32.9	37.9	3.98
钢纤维混凝土	5.78	7.16	33.4	40.6	3.01
纤维网混凝土	5.66	7.13	33.0	36.8	2.69
纤维混凝土	5.44	6.20	29.5	35.3	2.71

87.7%，7d 抗压强度分别为 28d 强度的 86.8%、82.3%、89.7% 和 83.6%，均满足 UTW 路面混凝土高早强的要求，所使用的高效减水剂为此提供了足够保障。4 种混凝土的 7d 抗弯拉、抗压强度差别不大，基本相同；其中钢纤维混凝土强度值最大，较普通混凝土分别增大 3.6% 和 1.5%，聚丙烯纤维混凝土强度值最小，较普通混凝土分别减小 2.5% 和 10.3%。4 种混凝土的 28d 抗弯拉、抗压强度差别较明显；其中钢纤维混凝土强度最大，聚丙烯纤维混凝土强度值最小；与普通混凝土相比，钢纤维混凝土、网状聚丙烯纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土的抗弯拉强度分别增大 15.9%、15.4% 和 0.3%，抗压强度钢纤维混凝土增大 7.1%，网状聚丙烯纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土分别减小 2.9% 和 6.9%。由此可见，钢纤维和 Fibermesh 网状聚丙烯纤维对混凝土强度性能改善明显，尤其是我们关心的抗弯拉强度；而德兰尼特聚丙烯纤维改善效果不太明显。

对 180d 抗弯拉弹性模量而言，纤维增强混凝土明显小于普通混凝土，钢纤维混凝土、纤维网混凝土和聚丙烯纤维混凝土分别为 3.01×10^{-4} MPa、 2.69×10^{-4} MPa 和 2.71×10^{-4} MPa，分别是普通混凝土的 75.6%、67.6% 和 68.1%。由此可见，纤维增强后对混凝土的韧性具有明显作用，尤其是网状聚丙烯纤维和单丝纤维，改善效果明显，这对改善 UTW 路面应力状况非常有利。

4 疲劳性能试验分析

研究采用 15cm × 15cm × 55cm 标准小梁试件和 10cm × 10cm × 55cm 小梁试件，利用美国 MTS (485 型) 电液伺服式疲劳试验机进行室内三分点法加荷弯曲疲劳试验。加载模式采用应力控制，加载波形采用连续正弦波形；加载频率选用 10Hz，正弦波荷载的高低应力比 $R = 0.1$ ，试验应力水平 S 选用 0.65、0.70、0.75、0.80、0.90，每种混凝土在同一应力比下进行 6 次平行试验；测试相应疲劳次数，对处理后的数据回归分析应力比与疲劳寿命之间的关系，从而对比分析各种混凝土的弯曲疲劳性能。

混凝土应力水平与疲劳寿命的回归模型采用双对

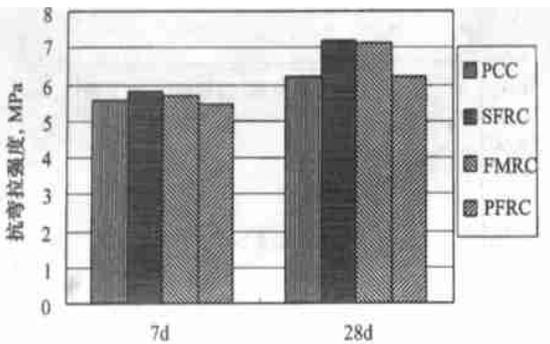


图 1 混凝土抗弯拉强度对比图

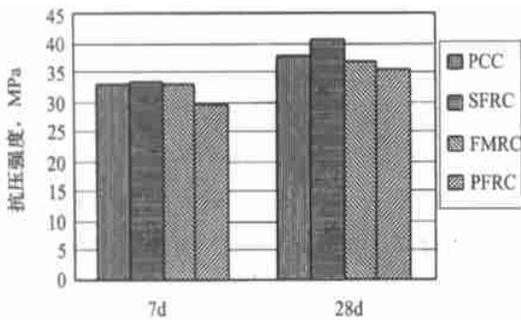


图 2 混凝土抗压强度对比图

试验结果可以看出，普通混凝土和纤维增强混凝土 28d 抗弯拉强度均大于 6.0MPa (配制强度为 5.75MPa)，28d 抗压强度均大于 35.0MPa，满足设计和使用要求。普通混凝土、钢纤维混凝土、网状聚丙烯纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土的 7d 抗弯拉强度分别为 28d 强度的 90.2%、80.7%、79.4% 和

数形式，即双对数疲劳方程为

$$\lg S = \lg \alpha - \beta \lg N_f$$

式中， S 为应力水平； α 、 β 为回归参数，由试验条件、加载方式及材料特性等因素决定； N_f 为疲劳破坏次数。

由于混凝土材料属于非均质材料，弯曲疲劳试验中的数据具有较大的分散性，本研究采用 Weibull 法处理数据，利用处理后具有 90% 存活率的弯曲疲劳数据进行分析，试验结果如表 10 和图 3 所示。

混凝土弯曲疲劳试验结果

表 10

混凝土类型	应力比	15cm × 15cm × 55cm 小梁		10cm × 10cm × 55cm 小梁	
		疲劳次数	疲劳方程	疲劳次数	疲劳方程
普通混凝土	0.90	182	$\lg S = \lg 1.130 - 0.0484 \lg N_f$ $R^2 = 0.9767$	58	$\lg S = \lg 1.048 - 0.0422 \lg N_f$ $R^2 = 0.9854$
	0.80	854		383	
	0.75	3182		2161	
	0.70	21528		14870	
	0.65	114461		99971	
钢纤维混凝土	0.90	731	$\lg S = \lg 1.301 - 0.0602 \lg N_f$ $R^2 = 0.9484$	133	$\lg S = \lg 1.131 - 0.0485 \lg N_f$ $R^2 = 0.9891$
	0.80	3424		1289	
	0.75	5395		4195	
	0.70	20002		13715	
	0.65	158253		126080	
网状聚丙烯纤维混凝土	0.90	587	$\lg S = \lg 1.230 - 0.0525 \lg N_f$ $R^2 = 0.9765$	87	$\lg S = \lg 1.071 - 0.0414 \lg N_f$ $R^2 = 0.9929$
	0.80	3050		749	
	0.75	7490		5438	
	0.70	46387		31192	
	0.65	246312		178589	

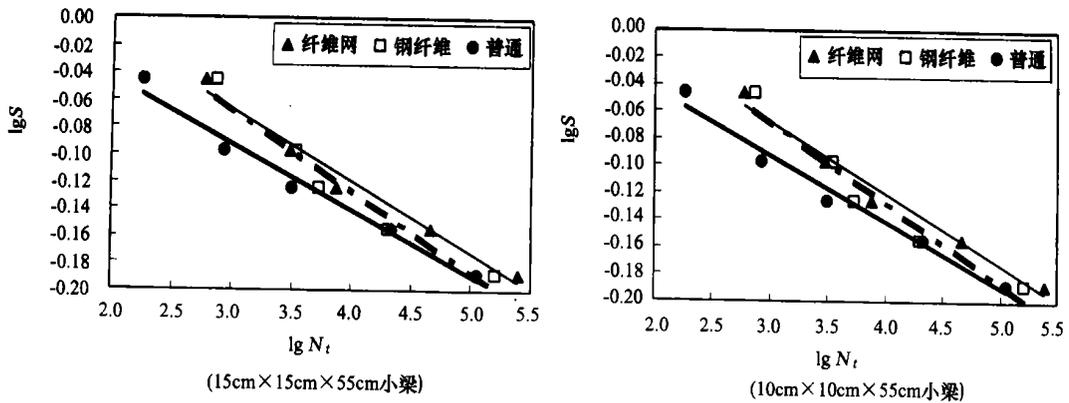


图 3 混凝土疲劳试验关系曲线

由试验结果可以看出，钢纤维混凝土和网状聚丙烯纤维混凝土的回归参数 α 值明显高于普通混凝土，标准梁试件分别提高了 15.13% 和 8.85%，小梁试件分别提高了 7.92% 和 2.19%，说明纤维增强混凝土的抗折疲劳性能明显增强。标准梁试验时，钢纤维混凝土和网状聚丙烯纤维混凝土的回归参数 β 值也明显高于普通混凝土，分别提高了 24.38% 和 8.47%；而小梁试验时，钢纤维混凝土提高了 14.93%，网状聚丙烯纤维混凝土降低了 1.90%； β 值增大，即疲劳曲线变陡，说明混凝土疲劳寿命随应力变化的敏感程度增加。同时，由图中曲线表明，在高应力水平 $S > 0.75 \sim 0.85$ 下，钢纤维混凝土的疲劳性能优于纤维网混凝土，但差别不大；较低应力水平时，纤维网混

土的疲劳性能明显优于钢纤维混凝土。

另外，通过计算 3 种混凝土的理论疲劳寿命（见表 11）可以得出，当应力水平增大时，纤维增强混凝土的疲劳寿命成倍增长。钢纤维混凝土在高应力水平时增长明显，随应力水平减小，增长幅度降低；而网状聚丙烯纤维混凝土在 0.65~0.90 应力水平范围内，疲劳寿命增长均很明显，而且相对比较稳定，说明纤维网的增韧作用比较明显，具有优良的弯曲疲劳性能。同时，小梁得出的理论疲劳寿命明显小于标准梁。

5 结论

(1) 钢纤维和 Fibermesh 网状聚丙烯纤维对混凝

混凝土理论疲劳寿命比较

表 11

应力水平 S	理论疲劳次数						相对于PCC 疲劳寿命增长率 (%)			
	PCC		SFRC		PFRC		SFRC		PFRC	
	标准	小梁	标准	小梁	标准	小梁	标准	小梁	标准	小梁
0.90	110	37	458	111	385	66	316.8	199.8	251.1	78.9
0.85	358	143	1182	360	1145	263	230.7	151.4	220.2	83.6
0.80	1251	602	3237	1257	3632	1137	158.7	108.6	190.3	88.8
0.75	4747	2780	9456	4754	12419	5405	99.2	71.0	161.6	94.4
0.70	19747	14259	29748	19719	46217	28613	50.6	38.3	134.0	100.7
0.65	91299	82555	101879	90884	189601	171387	11.6	10.1	107.7	107.6

土抗弯拉强度性能改善明显，而德兰尼特聚丙烯单丝纤维改善效果不太明显；从弹性模量试验可知，掺入3种纤维后提高了混凝土的柔韧性，尤其是网状聚丙烯纤维和单丝纤维，改善效果很明显，这对改善UTW路面应力状况非常有利。

(2) 与普通混凝土相比，纤维增强混凝土的疲劳寿命成倍增长，具有优良的弯曲疲劳性能；在高应力水平下，钢纤维混凝土的疲劳性能优于纤维网混凝土，但差别不大；低应力水平时，纤维网混凝土的疲劳性能明显优于钢纤维混凝土；通过计算理论疲劳寿命可以得出，钢纤维混凝土在高应力水平时增长明显，随应力水平减小，增长幅度降低；而网状聚丙烯纤维混凝土在0.65~0.90应力水平范围内，疲劳寿命增长均很明显，而且相对比较稳定，说明网状聚丙烯纤维的增韧作用更加明显。

(3) 综合混凝土强度性能和疲劳性能分析结果可以得出，掺入0.9kg/cm³网状聚丙烯纤维可以大幅度

提高混凝土的抗弯拉强度，降低弯拉弹性模量，明显提高混凝土的柔韧性，使疲劳寿命成倍增长，具有优良的弯曲疲劳性能；同时，与钢纤维混凝土相比，对混凝土的增韧作用更明显，且施工简便，分散均匀，不宜结团；因此，网状聚丙烯纤维混凝土适宜于UTW路面使用。

参考文献:

[1] Charles J Churilla. Ultra-Thin Whitetopping [J]. Public Roads, 1998, 62 (2).

[2] Speakman J.N. Sott III Ultra-Thin, Fiber Reinforced Overlays for Urban Intersections [R]. Washington: Transportation Research Record, TRB, National Research Council, 1996.

[3] Cole L Ultra-Thin Research Advances Whitetopping Technology [J]. Concrete Construction Magazine, 1995 (6).

[4] Cole L w., J P Moshen. Ultra-Thin Concrete Overlays on Asphalt [C]. Paper Prepared for Presentation at 1993 Transportation Association Annual conference, ACPA, 1993

(上接第7页) 不一定在缝的正上方，而是偏离一定的距离，偏离距离主要与层间结合强度有关。

(3) 通过观察，虽然沥青混凝土梁中反射裂缝已经发展到试件顶部，但土工织物仍没有出现破坏现象。因此可以继续起到加筋作用，这在一定程度上提高了结构的承载能力。

(4) 浸渍沥青土工布作为旧水泥混凝土加铺层夹层材料是一种较好的选择。

(5) 采用室内APA疲劳试验方法，不失为一种较好的荷载型疲劳模拟试验方法，可以方便快捷地对

各种类型沥青混合料和不同夹层材料的抗裂性能作出定性评价。

参考文献:

[1] 史保华, 等. 沥青加铺层改造机场旧水泥跑道防裂措施试验研究 [C]. 第八次全国石油沥青技术交流会论文集, 2002-05

[2] Asphalt Pavement Analyzer (APA) User's Guide, Pavement Technology [S]. INC

[3] 张肖宁, 等. 沥青混合料抵抗反射裂缝能力的评价方法研究 [J]. 华南理工大学学报, 2002, 29 (7): 82-85.