

文章编号:1671-1637(2016)02-0010-08

## 早强型含水不饱和聚氨酯混凝土力学性能

江 凯<sup>1</sup>, 苏 谦<sup>1</sup>, 冯 旭<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都市城市道路桥梁管理处, 四川 成都 610017)

**摘 要:**为解决普通聚氨酯混凝土和易性差、固化快与成型控制困难等问题,针对常见聚合物混凝土对骨料的高标准要求,提出了一种新型含水不饱和聚氨酯混凝土。应用配比试验、强度试验、掺水量试验、浸泡试验和现场取样试验,研究了含水不饱和聚氨酯混凝土的力学性能,分析了材料性质、材料配比、温度与掺水量等因素对其力学性能的影响。分析结果表明:当温度为10℃~20℃时,可加不饱和聚氨酯用量15%~20%的水,温度大于20℃时,可加不饱和聚氨酯用量20%~30%的水,现场工程应用和浸泡试验证明,这种含水不饱和聚氨酯混凝土1 d抗压强度为22.70 MPa,长期浸泡后未发现软化与崩解现象,因此,含水不饱和聚氨酯混凝土性能稳定,和易性好,成型控制容易,能够满足工程需要;在15℃温度条件下,推荐的基本配比为水泥、沙子、石子、ZK3、水、不饱和聚氨酯、引发剂与促进剂的质量比为1.000:5.700:7.300:1.300:0.080:2.000:0.050:0.025。

**关键词:**铁路路基;含水不饱和聚氨酯混凝土;配比试验;强度试验;掺水量试验;力学性能;影响因素  
**中图分类号:**U213.1 **文献标志码:**A

## Mechanical property of early-strength water-containing unsaturated polyurethane concrete

JIANG Kai<sup>1</sup>, SU Qian<sup>1</sup>, FENG Xu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;  
2. Administrative Department of Urban Roads and Bridges of Chengdu Municipality, Chengdu 610017, Sichuan, China)

**Abstract:** To solve the problem of poor workability, fast curing and molding difficulty of common polyurethane concrete, a new water-containing unsaturated polyurethane concrete was proposed according to the requirement of high standards for aggregate in common polymer concrete. The mechanical properties of water-containing unsaturated polyurethane concrete were investigated by ratio test, strength test, water-mixed test, immersion test and field sampling test, and the effects of material properties, material ratio, temperature and moisture content on the mechanical properties were analyzed. Analysis result shows when the added amount of water is 15%-20% of unsaturated polyurethane at 10℃-20℃, the added amount of water is 20%-30% of unsaturated polyurethane above 20℃, the compressive strength of 1 d for the water-containing unsaturated polyurethane concrete is 22.70 MPa in field engineering application and immersion test, and the phenomena of softening and disintegration are not found after long-term immersion. Obviously, the water-containing unsaturated polyurethane concrete has good stability, workability and formability that meet the engineering needs in the construction. At 15℃, the recommended mass

收稿日期:2015-10-25

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0941);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2014G003-D,2014G003-E)

作者简介:江 凯(1983-),男,重庆人,西南交通大学工学博士研究生,从事高速铁路与城市道路无损检测研究。

导师简介:苏 谦(1972-),男,山西运城人,西南交通大学教授,工学博士。

ratio of cement, sand, stone, ZK3, water, unsaturated polyurethane, initiator, and accelerant is 1.000 : 5.700 : 7.300 : 1.300 : 0.080 : 2.000 : 0.050 : 0.025. 8 tabs, 8 figs, 25 refs.

**Key words:** railway subgrade; water-containing unsaturated polyurethane concrete; proportioning test; strength test; water-mixed test; mechanical property; effect factor

**Author resumes:** JIANG Kai(1983-), male, doctoral student, +86-28-87600996, jiangkai1006@sina.com; SU Qian(1972-), male, professor, PhD, +86-28-87600996, suqian@126.com.

## 0 引言

隧道铺底破损是隧道中多发性强、治理困难的病害。隧道铺底破损后,造成道床翻浆冒泥,基床下沉,影响列车正常运行。一般而言,常用普通混凝土更换原有铺底材料,修复后的强度和刚度都能满足设计要求,但所需时间较长,即使在添加早强剂后也要7~10 d才能满足要求。列车慢行时间长,施工安全隐患大,难以保证施工质量。一般要求修复工程1~2 d恢复正常运行,隧道铺底早强混凝土在1~2 d达到列车运行所需要的强度20 MPa,并且所用混凝土材料要求能够在潮湿环境中自身骨料和周围材料结合良好。显然,采用普通水泥早强抢修材料满足不了工程要求,如果使用环氧树脂类材料,则由于施工工艺的复杂性、价格以及弹性模量的不匹配等原因,在经济上、实用性上均不能满足最佳使用要求。

聚氨酯材料是一种可以对原材料的化学结构、规格、品种等的配合比进行调节“设计”的高分子材料,通过这些调节“设计”可得到不同性质的产品<sup>[1]</sup>。国外自20世纪80年代以来开始了以聚氨酯材料作为道路路面抢修材料的研究<sup>[2-5]</sup>。聚氨酯混凝土是一种聚合物混凝土,是利用高分子材料作为胶结材料,使用混凝土制作工艺而产生的一种新型材料。通常可将聚合物混凝土分为3种:聚合物浸渍混凝土(PIC)、聚合物水泥混凝土(PCC)与聚合物树脂混凝土(PC)。聚合物浸渍混凝土是把已硬化的普通混凝土放在有机单体中进行浸渍,然后再通过加热或辐射的方法,使浸入到混凝土孔隙内的单体发生聚合作用,从而使混凝土与聚合物成为一体;聚合物水泥混凝土是一种将聚合物乳液与水泥作为混凝土胶凝材料,水化反应使聚合物乳液微粒包裹着水泥水化物,形成了统一的整体;聚合物树脂混凝土是一种使用树脂作为混凝土胶凝材料的聚合物混凝土<sup>[6]</sup>。韦灼彬等对聚氨酯树脂混凝土进行了试验研究,认为聚氨酯树脂混凝土凝固快,早期强度高,适合用于道路的快速修补<sup>[1]</sup>;高屹等利用聚氨酯发泡

材料作为机场道路基层快速抢修材料取得了良好的效果<sup>[7]</sup>;梁乃兴等对聚合物丁苯乳液改性混凝土的路用性能进行了研究,研究结果表明丁苯乳液改性混凝土的性价比高于普通水泥混凝土<sup>[8]</sup>;申爱琴研制了适用于路面修补的聚合物改性水泥材料<sup>[9]</sup>;罗立峰将聚合物钢筋混凝土用于桥面铺装中取得了较好的使用效果<sup>[10]</sup>。以上研究结果表明聚合物混凝土可主要用于机场跑道和公路面层的局部修补,其优点是:施工后硬化快,耐磨性与抗冲击性好,抗渗性与抗冻性好,黏结力强<sup>[4-7]</sup>。一般来说,其24 h的强度可以达到最终强度的80%,是一种优秀的快速修补材料,缺点是硬化时收缩大,耐火性差,单位体积造价较高<sup>[11-13]</sup>。

聚氨酯混凝土常由热固性液态树脂为胶结料,并加入固化剂、填料与砂石骨料配制而成,所用填料主要有硅粉、硫酸钡粉、水泥与粉煤灰等<sup>[14-20]</sup>;骨料与普通混凝土相同,但要求充分干燥,含水量小于0.15%;普通聚氨酯混凝土和易性差,固化快,在施工中成型控制较为困难<sup>[21-25]</sup>。为了降低成本,增加和易性,使材料能够适应潮湿的环境,本文提出了含水不饱和聚氨酯混凝土,并通过配比试验、强度试验、浸泡试验和现场取样试验,对比分析了含水不饱和聚氨酯混凝土力学性能与影响因素。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验材料

本文试验以普通混凝土常用的砂石料为骨料,以高分子材料为胶结料,在配比中加入少量水泥与早强减水剂等,以这些材料为基础相互搭配,从中选择最佳配比。试验原材料为普通425水泥、河砂(模数为2.2,含水量为10%~12%,表观密度为 $2.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,堆积密度为 $1\ 600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )、石子(最大粒径为31.5 mm,表观密度为 $2.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,堆积密度为 $1\ 590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )、早强剂(MZS高效早强剂与FDN萘磺酸盐减水剂)、氯化钙、不饱和聚氨酯与固化剂(由引发剂甲乙酮和促进剂环烷酸钴组成)。

## 1.2 各种聚合物混凝土强度指标

聚合物混凝土常用的胶结材料有环氧树脂、不饱和聚氨酯、呋喃树脂、脲醛树脂、聚氨酯与甲基丙烯酸甲酯单体等。不饱和聚氨酯混凝土与普通混凝土相比,具有良好的耐久和力学性能,其抗压强度、抗折强度、抗弯强度均高于普通混凝土,其抗压强度

可高达 80~100 MPa,抗拉强度约为 10 MPa,抗弯强度为 10~30 MPa;1 d 龄期强度可达 28 d 强度的 50%以上,3 d 龄期强度可达 28 d 强度的 70%以上,有利于快速修补施工;对金属、木材、石材与混凝土都有很好的黏结强度。各种聚合物混凝土强度指标对比结果见表 1。

表 1 聚合物混凝土强度指标

Tab. 1 Strength indexes of polymer concretes

测试指标/ MPa	普通混凝土	聚合物混凝土				
		环氧树脂混凝土	不饱和聚氨酯混凝土	呋喃树脂混凝土	聚氨酯混凝土	酚醛树脂混凝土
抗压强度	10~60	80~120	80~160	50~140	65~72	24~25
抗拉强度	1~5	10~11	9~14	6~10	8~9	2~3
抗弯强度	2~7	17~31	14~35	16~32	20~23	7~8
弹性模量	2~4	1~4	1~4	2~3	1~2	1~2

## 1.3 试验方案

为深入分析不饱和聚氨酯混凝土的力学特性,了解其影响因素,进行了 4 组对比试验:试验一为不同用量引发剂和促进剂下不饱和聚氨酯改性水泥混凝土的强度对比试验;试验二为不同气温下含水不饱和聚氨酯混凝土的强度对比试验;试验三为不同粉体添加剂下不饱和聚氨酯混凝土的强度对比试验;试验四为多种早强添加剂混凝土与不饱和聚氨酯混凝土的强度对比试验。

通过强度试验测定各种条件下聚氨酯混凝土的力学强度,试验步骤为:首先制作不饱和聚氨酯混凝土样品,直径为 4 cm,高度为 8 cm;经初步试验,当 1~2 d 强度指标达到 20 MPa 时,再配制混凝土标准试块,进行强度测试。

## 2 试验结果分析

### 2.1 早强型混凝土的强度变化规律

普通早强混凝土是在混凝土中掺入早强剂以加快混凝土早期硬化,提高早期强度,缩短养护时间。把双快水泥加入到普通 425 硅酸盐水泥中,加入量越多,早期强度越高,但没有达到理想指标。此后又在普通水泥中加入各种早强剂,结果表明只有添加 MZS 高效早强剂、普通早强剂和 30% 双快水泥时效果较好,但仍然没有达到要求,说明添加单一类型添加剂难以获得理想效果。基于此,本文对多种单一添加剂与相互复合添加效果进行试验,选用的聚合物添加剂有丙烯酸钙、脲醛树脂、R-161 聚丙烯酸酯,选用的早强剂有氯化钙、氯酸钠、早强减水剂、MZS 高效早强剂、FDN、NNO 和 OH。

试验方案见表 2,试件见图 1,试验结果见图 2,

单一使用普通水泥时,混凝土 1 d 抗压强度为 2.72 MPa,7 d 强度为 16.98 MPa,28 d 强度为 20.93 MPa;普通水泥中掺入双快水泥的 1 d 抗压强度为 5.47 MPa,7 d 强度为 15.08 MPa,28 d 强度为 27.26 MPa;普通水泥中掺入 MZS 高效早强剂的 1 d 抗压强度为 6.55 MPa,7 d 强度为 18.84 MPa,28 d 强度为 22.79 MPa;普通水泥中掺入丙烯酸钙的 1 d 抗压强度为 2.57 MPa,2 d 抗压强度为 5.20 MPa;普通水泥掺入不饱和聚氨酯和脲醛树脂的 1 d 强度为 11.77 MPa,2 d 强度为 22.66 MPa;普通水泥掺入不饱和聚氨酯的 1 d 抗压强度为 20.6 MPa,达到设计要求的强度;普通水泥掺入不饱和聚氨酯和 ZK3 添加剂的 1 d 强度达到 24.5 MPa。可见掺入不饱和聚氨酯的混凝土获得满意的指标,但试件制作过程中未加水,实际操作时和易性差。



图 1 混凝土试件

Fig. 1 Test specimens of concrete

### 2.2 不饱和聚氨酯混凝土固化规律

不饱和聚氨酯作为新型早强混凝土的胶结材料,其固化时间与规律对新型聚合物混凝土的配方设计与适用范围的确定至关重要。本文首先研究了单一不饱和聚氨酯的固化特性,通过对比试验分析

表 2 混凝土试验方案

Tab. 2 Experimental schemes of concrete

试验方案	添加剂组合方式	添加剂用量/g		粗料用量/g	
		水泥	其他	砂	石子
1	425 水泥	100.0		800	1 000
2	425 水泥+双快水泥	70.0	30.0	800	1 000
3	425 水泥+MZS 高效早强剂	98.5	1.5	800	1 000
4	425 水泥+丙烯酸钙	94.0	6.0	800	1 000
5	425 水泥+不饱和聚氨酯+脲醛	400.0	250.0	800	1 100
6	425 水泥+不饱和聚氨酯	400.0	250.0	800	1 100
7	425 水泥+不饱和聚氨酯+ZK3	240.0	250.0	800	1 100

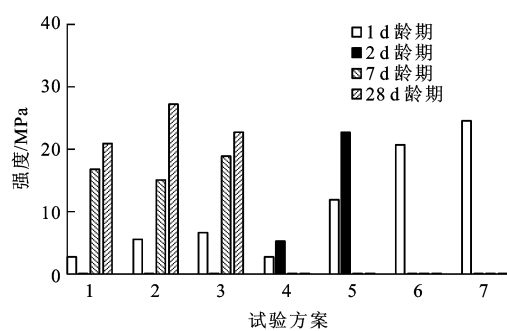


图 2 不同试验方案的混凝土强度

Fig. 2 Concrete strengths in test schemes

在不饱和聚氨酯含量相同情况下,不同引发剂和促进剂掺量对不饱和聚氨酯固化规律的影响,分析结果见表 3。纯不饱和聚氨酯的固化时间与固化剂的用量密切相关,随着固化剂用量的增加其固化时间急剧减小,固化剂最小用量为 0.25%。在纯不饱和聚氨酯研究基础上,对不饱和聚氨酯水泥砂浆固化

表 3 不饱和聚氨酯固化时间

Tab. 3 Curing times of unsaturated polyurethane

试验方案	不饱和聚氨酯 用量/g	引发剂用 量/%	促进剂用 量/%	凝固时间/ min
1	30	1.0	0.30	190
2	30	1.5	0.45	18
3	30	2.0	0.60	11
4	30	3.0	0.90	9
5	30	4.0	4.00	6
6	30	0.5	0.50	1 440

时间进行了测试,主要观察其初凝时间,测试方案见表 4,测试结果见图 3。试验结果表明,砂子、水泥、不饱和聚氨酯用量相同时,随固化剂用量增加初凝固化时间缩短,说明初凝时间的控制,促进剂起主要作用;水泥在配料中起促凝作用,在不加水泥的情况下,凝固时间显著延长。

表 4 不饱和聚氨酯水泥砂浆测试方案

Tab. 4 Test schemes of unsaturated polyurethane cement mortar

试验 方案	不饱和聚氨酯 用量/g	水泥用量/g	砂子用量/g	粉砂用量/g	粉煤灰用量/g	固化剂用量	
						引发剂用量/%	促进剂用量/%
1	25	40	120	0	0	3.0	3.0
2	25	40	120	0	0	2.0	2.0
3	25	40	120	0	0	2.0	0.6
4	25	0	120	40	0	2.0	2.0
5	25	0	120	0	40	3.0	2.0
6	25	0	120	0	40	5.8	2.0

2.3 聚氨酯混凝土掺水量影响性

不饱和聚氨酯混凝土是一种高强度快速凝固混凝土,一般规定不饱和聚酯混凝土施工时不允许加水,在不加水条件下,不饱和聚氨酯混凝土的 1 d 强度能达到 48.8 MPa。但是其和易性差,固化快,在施工中使用有一定困难,另外一个缺点就是价格较高。为了降低成本,并增加和易性,本文

将水和水泥引入不饱和聚氨酯混凝土,不仅水能增加该类混凝土的和易性,而且水与水泥反应形成一种黏结剂,并释放部分热量,有利于提高该类混凝土的早期强度,因此,需要选择一种适合的引水剂使水与不饱和聚氨酯能够融合。本文对掺加脲醛树脂、丙烯酸和丙烯酸钙的不饱和聚氨酯进行对比试验,结果表明脲醛树脂加入量不宜超过

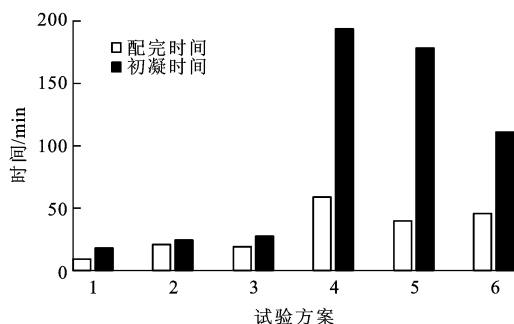


图3 不饱和聚氨酯水泥砂浆固化时间

Fig. 3 Curing times of unsaturated polyurethane cement mortars

不饱和聚氨酯的 20%，否则将延长固化时间，早期强度低。根据配备不同砂浆固化时间得出丙烯酸加水具有促凝作用，有放热现象，而使用丙烯酸钙做添加剂，没有放热现象，硬结后强度比丙烯酸改性不饱和聚氨酯混凝土高，因此，本文采用丙烯酸钙改

表5 含水不饱和聚氨酯混凝土可行性试验方案

Tab. 5 Feasibility test schemes of water-containing unsaturated polyurethane concrete

试验方案	不饱和聚氨酯用量/g	水泥与 ZK3 用量/g	固化剂用量/%	水用量/g	水酯比/%	重度/(g·cm <sup>-3</sup> )	温度/℃	备注
1	280	100	5	0	0	2.45	6	固化快，难成形
2	250	100	4	40	16	2.45	7	123 min 凝固
3	250	100	4	60	24	2.60	6	60 min 凝固
4	250	150	5	66	26	2.35	15	75 min 凝固

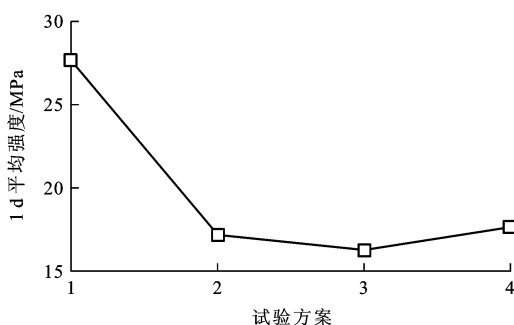


图4 含水不饱和聚氨酯混凝土可行性试验结果

Fig. 4 Feasibility test result of water-containing unsaturated polyurethane concrete

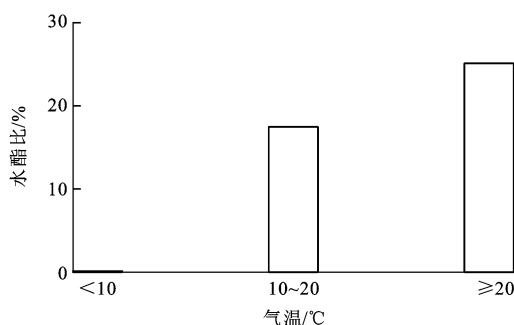


图5 不同气温下对应的水与不饱和聚氨酯的比值

Fig. 5 Ratios of water and unsaturated polyurethane at different temperatures

性不饱和聚氨酯混凝土。

根据现场工程需求，加水不饱和聚氨酯混凝土的 1 d 强度必须达到 20 MPa。为此，针对不同温度与掺水量的不饱和聚氨酯混凝土强度变化规律进行研究，以确定其可行性，试验方案与结果分别见表 5 与图 4。试验结果表明：不饱和聚氨酯混凝土在不同气温条件下采用合适的掺水量，可保证 1 d 龄期强度达 20 MPa 以上。如图 5 所示，为保证 1 d 强度不低于 20 MPa 必须要根据施工的气温采用不同的掺水量：当气温低于 10℃ 时，不能掺水；当气温为 10℃~20℃ 时，可加不饱和聚氨酯用量的 15%~20% 的水量；当气温在 20℃ 以上时，可加不饱和聚氨酯用量的 20%~30% 的水量。四川冬季 1、2 月份气温为 3℃~7℃，加水后的聚氨酯混凝土强度大大降低，1 d 龄期强度仅为 15 MPa。

本文初步确定了一个基本配比，即不饱和聚氨酯、水泥、填料、粗料（砂+石）、固化剂（引发剂+促进剂）的质量比为 250:150:200:(800+1100):(7.5+3.75)，在此基础上改变水的用量，测定材料 1 d 强度和弹性模量，以确定最佳掺水量。试验方案与结果分别见表 6 和图 6，含水不饱和聚氨酯混凝土存在一个最优掺水量，使用时应根据实际情况进行选择。

表6 含水不饱和聚氨酯混凝土强度试验方案

Tab. 6 Test schemes of water-containing unsaturated polyurethane concrete's strength

试验方案	固化剂用量/%		水用量/g	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
	引发剂	促进剂		
1	7.5	3.75	35	2.45
2	7.5	3.75	40	2.45
3	7.5	3.75	50	2.50
4	7.5	3.75	64	2.50
5	7.5	3.75	100	2.45

## 2.4 不饱和聚氨酯混凝土粉体添加剂的影响

在大多数情况下，为了改善混凝土质量，增加密实度，降低成本，有必要加入适宜的填料。填料性质要符合下列几点要求：化学上是惰性的，含金属量低，不影响不饱和聚氨酯固化速度；颗粒直径为 1~

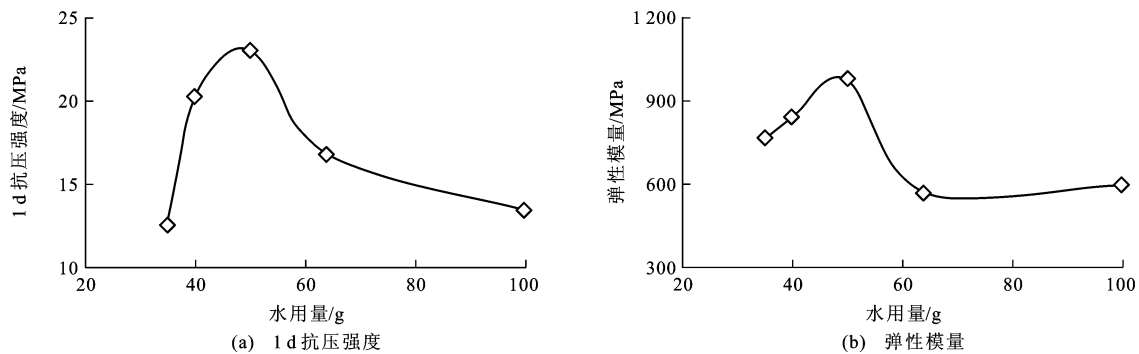


图 6 不同掺水量条件下混凝土强度参数

Fig. 6 Intensity parameters of concretes with different water contents

3 mm,易分散在不饱和聚氨酯中;吸油量或吸不饱和聚氨酯量小;密度一般低于 $2.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;价格便宜易得,质量稳定。本次试验采用的粉体添加剂有石英粉、硫酸钡粉、粉煤灰和 ZK3,对比测试结果见表 7。试验结果表明,石英砂优于 ZK3,ZK3 优于硫酸钡粉和硫酸钡加粉煤灰。在不加水的情况下,粉煤灰和水泥起的作用相当;在加入水的条件下,水泥起促凝作用,水泥量越多,混凝土固化越快。依据经济性、可操作性和保证 1 d 强度达到 20 MPa 的要求,在工程应用中选择自行研制的 ZK3 作为添加剂。

表 7 添加剂对不饱和聚氨酯混凝土强度的影响

Tab. 7 Influence of additives on strength of unsaturated polyurethane cement

不饱和聚氨酯 用量/g	水泥 用量/g	填料用量/g		粗粒用量/g		固化剂用量/g		水用量/g	温度/℃	1 d 强度/ MPa	备注
		ZK3	其他	砂	碎石	引发剂	促进剂				
250	150	0	石英砂 200	800	1 100	2	2	50	14	15.5	2.0 h 凝固
250	150	200	0	800	1 100	2	2	50	14	13.3	1.3 h 凝固
250	150	0	石英砂 200	800	1 100	3	2	66	15	18.6	1.1 h 凝固
250	150	200	0	800	1 100	3	2	66	15	17.6	1.2 h 凝固
250	100	300	0	800	1 100	2	2	80	6	20.0	0.9 h 凝固
250	100	150	钡粉 150	800	1 100	2	2	80	6	17.1	0.7 h 凝固
250	100	300	0	800	1 100	2	2	40	7	17.1	2.2 h 凝固
250	100	0	钡粉 300	800	1 100	2	2	40	7	15.1	2.1 h 凝固

3 工程应用结果分析

根据采用不饱和聚氨酯、脲醛树脂和丙烯酸钙配成的改性混凝土强度试验结果,把脲醛树脂与不饱和聚氨酯混合作为胶结材料来配制不饱和聚氨酯水泥混凝土,曾在成昆线某隧道进行应用,隧道铺底混凝土破损原因是基底受力不均,局部应力集中,而产生折断破坏;岩层风化,强度降低,承载力满足不了行车要求而引起铺底混凝土破坏,风化岩层形成泥浆从破损混凝土裂缝中翻冒进道床,形成翻浆冒泥,基床下沉,影响列车运行安全。其设计配方为:不饱和聚氨酯 200 g+脲醛 50 g+水泥 400 g+砂 700 g+石子 1 100 g+水 50 g,检测的 1 d 强度指标仅有 4.1~4.3 MPa,没有达到理想要求。可见,在新材料的实践环节,许多技术参数都要重新确定,例如混凝土砂浆对各种材料的适应性,不饱和聚

氨酯混凝土砂浆的和易性,引发剂、促进剂的选择和用量,以及温度对早期强度的影响等,需进行条件试验以调整配比,使材料早期强度满足设计要求。

不饱和聚氨酯混凝土施工现场见图 7,试验方案见表 8,试验结果见图 8。试验结果显示方案 4 的条件较为优秀,1 d 抗压强度可达 20.25 MPa,2 d



图 7 施工现场

Fig. 7 Construction site

抗压强度为 28.96 MPa,符合设计要求。主要材料不饱和聚氨酯的用量较最初的方案减少了 60%,大幅度降低了材料费用,且本方案可以补加水,使不饱和聚氨酯混凝土的和易性好,易于施工。本工点推荐的现场施工基本配比如下:水泥、沙子、石子、ZK3、水、不饱和聚氨酯、引发剂与促进剂的质量比为 1.000 : 5.700 : 7.300 : 1.300 : 0.080 : 2.000 : 0.050 : 0.025。现场施工时间为 11 月份,施工时室外气温为 14℃~16℃。现场施工材料的配制是用混凝土搅拌机搅拌,搅拌时间比普通混凝土稍长 2~3 min,加水量按设计加水量自动控制。搅拌好的不饱和聚氨酯混凝土砂浆,及时运到铺设场地,倾入轨道下面平整的路基上,找平不饱和聚氨酯混凝土砂浆,然后振动夯实。

表 8 现场试验方案

Tab. 8 Field test schemes

试验 方案	ZK3 用量/g	不饱和聚氨酯 用量/g	固化剂用量/g		水用量/ g	温度/ ℃
			引发剂	促进剂		
1	3.3	3.3	0.100	0.05	9	14
2	1.3	1.7	0.050	0.03	18	14
3	2.5	2.5	0.075	0.04	18	14
4	1.3	2.0	0.060	0.03	15	14

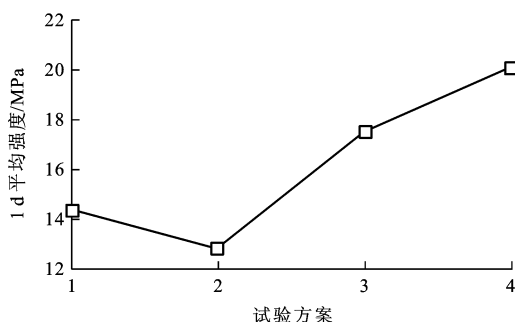


图 8 试验结果

Fig. 8 Test result

施工中同步从搅拌好的不饱和聚氨酯混凝土砂浆中随机取样做强度检测,1 d 抗压强度为 22.70 MPa,28 d 强度为 31.72 MPa,亦满足现场施工要求。用本配方配置的不饱和聚氨酯混凝土砂浆和易性好,初凝时间可控制在 25~35 min。取初凝后的试样放入水中进行浸泡试验,试样不软化,不崩解;浸泡一个月后样品也未发现软化崩解,试验研究达到了预期的要求。

## 4 结 语

(1)掺水量的取值对含水不饱和聚氨酯混凝土的性能起决定性作用,在不同温度下使用合适的掺

水量可以改善和易性,降低工程造价,避免了骨料必须干燥的要求,增大了适用范围。

(2)加入填料能明显改善含水不饱和聚氨酯混凝土的性质,所采用的细料不仅可以提高骨料的密实度,而且可以改善混凝土的和易性,提高含水不饱和聚氨酯混凝土的强度。

(3)可通过适当增加固化剂的用量来提高含水不饱和聚氨酯混凝土的强度,随着固化剂用量的增长其固化时间急剧减小,但应注意固化剂的严格称量,较小的误差也会给硬化速度和力学性能带来较大幅度的变化。

(4)聚氨酯混凝土强度高,固化快,1 d 强度可达 20 MPa 以上,但价格高,和易性差。为降低成本并增加和增强聚氨酯混凝土的和易性,研究了含水不饱和聚氨酯混凝土的性能,根据不同气温参加不同水量,使其 1 d 强度不低于 20 MPa。

(5)采用含水不饱和聚氨酯混凝土对隧道铺地损害进行成功整治,其 1 d 强度达到 22.27 MPa,在水中不软化,不崩解,满足设计要求。在 15℃ 温度条件下,推荐的基本配比为:水泥、砂子、石子、ZK3、水、不饱和聚氨酯、引发剂与促进剂的质量比为 1.000 : 5.700 : 7.300 : 1.300 : 0.080 : 2.000 : 0.050 : 0.025。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 韦灼彬,王铁成,高 屹. 早强快硬聚氨酯混凝土的试验研究[J]. 混凝土,2005(9):58-64.  
WEI Zhuo-bin, WANG Tie-cheng, GAO Yi. Experiment on a type of polyurethane concrete possessing early strength and speedily solidification[J]. Concrete, 2005(9): 58-64. (in Chinese)
- [2] MARZOCCHI A, ROBERTN G, BOLEN G E. Road pavement and repair: USA, US 4265563[P]. 1981-05-05.
- [3] CHATTOPADHYAY D K, RAJU K V S N. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications[J]. Progress in Polymer Science, 2007, 32(3): 352-418.
- [4] OHAMA Y. Recent progress in concrete-polymer composites[J]. Advanced Cement Based Materials, 1997, 5(2): 31-40.
- [5] SARVA S S, DESCHANEL S, BOYCE M C, et al. Stress-strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates[J]. Polymer, 2007, 48(8): 2208-2213.
- [6] 彭全敏. 聚氨酯材料快速修补机场跑道的试验研究[D]. 天津:天津大学,2005.  
PENG Quan-min. Experiment research on rapid pavement repair of airfield runway by employing polyurethane materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)

- [7] 高 屹,韦灼彬,王铁成. 机场道面抢修用聚氨酯稳定集料的试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(3): 104-107.  
GAO Yi, WEI Zhuo-bin, WANG Tie-cheng. Experimental study on the polyurethane materials used for rapid repair of airfield pavement[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(3): 104-107. (in Chinese)
- [8] 梁乃兴,曹源文,姚红云. 聚合物改性水泥混凝土路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 21-23.  
LIANG Nai-xing, CAO Yuan-wen, YAO Hong-yun. Research on performance of cement concrete modified with styrene butadiene latex[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 21-23. (in Chinese)
- [9] 申爱琴. 水泥混凝土路面裂缝修补材料研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.  
SHEN Ai-qin. Study on the crack mending materials of cement concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [10] 罗立峰. 钢纤维增强聚合物混凝土桥面铺装层修筑技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2002.  
LUO Li-feng. Construction technology of SFRPC bridge deck pavement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [11] PATEL P S D, SHEPHERD D E T, HUKINS D W L. Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2008, 9(1): 137-141.
- [12] MOLINDA G. Reinforcing coal mine roof with polyurethane injection: 4 case studies [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(5): 553-566.
- [13] LEE S H, WANG S, PHARR G M, et al. Evaluation of interphase properties in a cellulose fiber-reinforced polypropylene composite by nanoindentation and finite element analysis[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(6): 1517-1524.
- [14] HOUSHYAR S, SHANK R A, HODZIC A. The effect of fiber concentration on mechanical and thermal properties of fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 96(6): 2260-2272.
- [15] DAVIDOVITS J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1991, 37(8): 1633-1656.
- [16] DAVIDOVITS J. Recent progresses in concretes for nuclear waste and uranium waste containment[J]. Concrete Intimation, 1994, 16(12): 53-58.
- [17] 张 琳. 水泥混凝土路面快速修补材料的研究与开发[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
ZHANG Lin. Study and develop on rapid repair materials of cement concrete pavements[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [18] STRAND D, MACDONALD C N, RAMAKRISHNAN V, et al. Construction applications of Polyolefin fiber reinforced concrete[C]//ASCE. Proceedings of ASCE 4th Materials Engineering Conference. Reston: ASCE, 1996: 103-112.
- [19] 彭小芹,杨 涛,王开宇,等. 地聚合物混凝土及其在水泥混凝土路面快速修补中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 205-210.  
PENG Xiao-qin, YANG Tao, WANG Kai-yu, et al. Preparation of geopolymeric concrete and its application to rapid repair of cement concrete pavement[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(2): 205-210. (in Chinese)
- [20] 杨若冲,谈至明,黄晓明,等. 掺聚合物的橡胶混凝土路用性能研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 15-19.  
YANG Ruo-chong, TAN Zhi-ming, HUANG Xiao-ming, et al. Research on performance of rubberized concrete incorporated with polymer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 15-19. (in Chinese)
- [21] FOWLER D W. Polyenes in concrete: a version for the 21st century[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(5/6): 449-452.
- [22] DOWNING T D, KUMAR R, CROSS W M, et al. Determining the interphase thickness and properties in polymer matrix composites using phase imaging atomic force microscopy and nanoindentation[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2000, 14(14): 1801-1812.
- [23] JANOTKA I, KRAJCI L, RAY A, et al. The hydration phase and pore structure formation in the blends of sulfoaluminate-belite cement with Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(4): 489-497.
- [24] AL-NEGHEIMISH A I, ALHOZAIMY A M. Impact of extremely hot weather and mixing method on changes in properties of ready mixed concrete during delivery[J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(5): 438-444.
- [25] 高 屹,韦灼彬. 聚氨酯混合材料发泡技术现场试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(增 1): 198-202.  
GAO Yi, WEI Zhuo-bin. Experimental study on frothing techniques with mixed polyurethane materials[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 198-202. (in Chinese)