

文章编号 1002-0268(2006)08-0009-05

高性能环氧树脂处治水泥混凝土路面裂缝研究

张 磊¹, 黄 卫¹, 宗 海²

(1. 东南大学 ITS 研究中心, 江苏 南京 210096; 2. 南京长江第四大桥筹建处, 江苏 南京 210008)

摘要: 水泥混凝土路面由于设计、施工、养护不当极易产生收缩裂缝, 对于水泥混凝土路面的使用寿命有着极大影响, 是水泥混凝土路面丧失承载力的主要原因之一。首先对水泥混凝土裂缝修复机理进行分析, 提出了修复材料的性能要求。接着, 通过系统的室内试验和对比, 指出了高性能环氧树脂材料是处治水泥混凝土路面收缩裂缝的优良途径之一, 并提出了水泥混凝土路面裂缝相关分析的系统试验方法。

关键词: 水泥混凝土路面; 收缩裂缝; 环氧树脂; 处治

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

Research on Using High Performance Epoxy Resin to Treat the Cracks in Concrete Pavement

ZHANG Lei¹, HUANG Wei¹, ZONG Hai²

(1. ITS Research Center, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China;

2. Construction Preparation Department of Nanjing Forth Yangze River Bridge, Jiangsu Nanjing 210008, China)

Abstract: Because of improper design, construction or maintenance, cracks may occur on concrete pavement which greatly affect the service life of concrete pavements. The crack is one of the main reasons which lead the concrete pavement to lose its bearing capacity. The treatment mechanism of concrete pavement cracks is investigated, and the indexes of treatment materials are proposed. Based on the systemic tests in laboratory, it is found that high performance epoxy resin can be applied to treat the cracks caused by shrinkage of concrete pavement. The testing methods about analysis of concrete pavement cracks are also proposed.

Key words: concrete pavement; shrinkage cracks; epoxy resin; treatment

0 前言

水泥混凝土是桥梁与道路工程建设中应用最为广泛的建筑材料之一, 特别是随着我国高等级公路建设事业的发展, 水泥混凝土路面与桥梁得到了飞速的发展。水泥混凝土是以水泥和水组成的水泥浆体为粘结介质, 将分散其间的不同粒径的粗、细集料胶结起来, 在一定的条件下, 硬化成为具有一定力学性能的一种人工建筑石材。水泥混凝土路面是以水泥混凝土做面层(配筋或不配筋)的路面^[1], 是

一种分散荷载能力较强(刚度较大)、稳定性能优越的刚性路面结构, 美国高速公路中有超过 40% 的路面是水泥混凝土路面结构, 日本也有超过 25% 的高等级水泥混凝土路面, 我国的通车高速公路当中水泥混凝土路面结构也占有很大的比例, 且世界各国均未放弃对于水泥混凝土路面结构的试验研究, 为水泥混凝土路面结构的发展打下坚实的基础。

虽然水泥混凝土拥有高强度、高稳定性等优点, 但是其受设计、施工、养护与使用条件的限制较大, 施工不当必然会给后期使用埋下隐患, 养护不及时

收稿日期: 2005-04-25

作者简介: 张磊 (1977-), 男, 江苏无锡人, 博士, 研究方向为道路与铁道工程. (kingsnake1@163.com)

或过于苛刻的使用条件均会导致水泥混凝土路面出现各种破坏。水泥混凝土路面板的早期病害主要有裂缝、唧泥、错台等几个方面^[2]，其中尤其以施工、养护等造成的裂缝病害对后期使用最为不利。从形式上区分，水泥混凝土路面板裂缝病害主要有横向裂缝、纵向裂缝和龟裂等几种。裂缝病害中最为主要的就是收缩裂缝。

1 收缩裂缝成因及其影响

水泥混凝土路面在多种因素(如温度骤变或某些外加剂的大量使用)的综合作用下必将产生收缩，如果收缩受到外界的约束，会在混凝土板体内部产生应力，在这种应力作用下混凝土板所出现的裂缝即是收缩裂缝。导致水泥混凝土路面板出现收缩裂缝病害的原因比较复杂，主要有以下几个方面：

(1) 水泥品种及其含量(水灰比等)：主要是因为水泥在水化过程中产生较大的热量，因而其收缩变形也较大。已有研究表明，水泥的收缩性能与其中的石膏以及 SiO_2 含量有较大关联。

(2) 集料类型：集料的强度、模量、含量等对水泥混凝土的收缩性能也有一定的影响。

(3) 水泥混凝土配合比。

(4) 外加剂：大量的外加剂对水泥混凝土的收缩性能有较大的影响，如氯化钙的参量与收缩性能有较大的关联。

(5) 施工、使用条件(环境条件)。

(6) 养护条件：众所周知，提高养生时的湿度与温度等对减少水泥混凝土收缩裂缝有不可忽视的功效。

裂缝的出现对于水泥混凝土路面结构是致命的。裂缝将导致水泥混凝土板体在行车荷载作用下形成应力集中现象，而且将引起雨水直接下渗，在行车荷载作用下形成裂缝内部高压水，不断冲刷裂缝内部，导致裂缝加剧，最终导致基层出现唧泥病害，混凝土板整体断裂，丧失承载能力。对于水泥混凝土桥梁更是需要注意，水分下渗会导致钢筋锈蚀，将直接危及桥梁结构的安全。因此，必须对水泥混凝土路面结构所出现的裂缝进行及时的处理。如何处理这些裂缝成为目前诸多学者和研究机构十分关注的热点问题。

对水泥混凝土路面裂缝病害的处理通常采用灌浆法(裂缝宽度较小)或切割、开槽法(宽度较大)。无论从经济角度还是对交通影响的因素来看，对于宽度不大的裂缝或不规则的大量收缩裂缝而言，采用切割、开槽的处理方式不仅操作过于繁冗，而且

可能会导致适得其反的效果。因此，采用灌浆法处理水泥混凝土路面板出现的收缩裂缝成为目前最受欢迎的裂缝修复方法之一。

2 裂缝修复机理

采用灌浆法处理混凝土表面裂缝病害，有些学者存在这样的观点：为了达到密封裂缝的效果，需要采用延伸率较大的材料(如改性沥青或高延伸率环氧树脂等)，以满足混凝土在裂缝处存在的较大的应变趋势。

对于聚合物环氧树脂类灌缝处理材料的断裂延伸率是通过哑铃状拉伸试验来测定的，通过测定拉伸时的破坏荷载与试件标准断面的横截面尺寸因子(面积)，来计算材料的断裂延伸率(以百分率计)。仔细观察整个拉伸试验过程可以发现，在试件受力拉伸过程中，试件逐渐伸长。当聚合物环氧树脂密封剂被应用于狭小裂缝中时，水泥混凝土的收缩变形在裂缝处产生的应力集中导致裂缝内部的环氧树脂密封剂产生变形，但是由于常温下密封剂体积变化不大，密封剂在与混凝土裂缝周壁粘结牢固的条件下根本不能产生较大的变形，最终裂缝处会在密封剂没有达到试验中测定的断裂延伸率情况下就出现二次开裂。试验室内带有不同裂缝深宽比的水泥混凝土小梁弯曲试验结果表明(图1)，水泥混凝土桥面铺装层表面的裂缝宽度一般均较小($<2\text{mm}$)，因此，裂缝断面尺寸因子(深宽比)越小(即裂缝的深度较小)，弯曲前后的表面应变值相差较小，而随着裂缝深度的增加，弯曲前后的应变值相差也较大。因此，在裂缝发展到出现结构性破坏之前，特别是早期裂缝阶段，修复后出现二次开裂的应变和初次开裂的情况相差不大，这与上述分析是一致的。

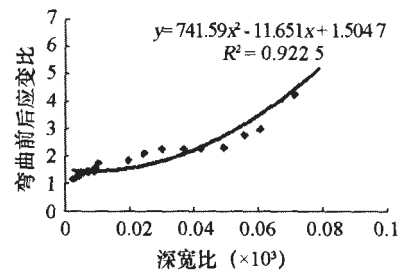


图 1 不同深宽比的小梁弯曲试验结果

Fig.1 Beam bending tests of different depth-width ratio

由此可见，对于细小裂缝的灌浆密封处理应该以增加裂缝周壁的粘结强度为原则，而并非是修复材料的断裂延伸率。另外，从降低裂缝处应

力集现象的角度出发，所选择的灌浆材料在保证粘结强度的基础上，其混合后的粘度应该尽可能小，以能够达到基本灌充裂缝缺陷处的目的，同时提供一个平顺的荷载传输界面，达到修复处理的目的。

3 试验研究

3.1 材料概述

水泥混凝土路面的收缩裂缝处理研究选择 YBL[®] 高性能聚合物环氧树脂密封剂。YBL[®] 高性能聚合物环氧树脂密封剂由环氧树脂与环氧固化剂 2 组分构成，按照一定的比例混合后固化成型。YBL[®] 材料相关技术指标如表 1 所示。

表 1 YBL[®] 环氧树脂技术指标 (23)
Tab.1 Epoxy resin technical indexes for type YBL[®]

材料特性	试验结果	试验方法	备注
混和比例 (体积) A B	4 1	-	-
组分 A	95		
粘度 /cP	组分 B	10	参 ASTM D2393
	混合物	75	
混合物闪点 /	>80	参 JTJ 052- 2000	-
100 g	12 min	参 ASTM C881	壶粘时间
固化时间	1 mm 薄膜	5 h	- 手触摸干燥时间

注：壶粘是反映聚合物反应过程中大量聚合物堆积在一起，放热较大而导致反应剧烈的状态。壶粘时间可以用于评价聚合物的实际可操作时间。

由表 1 中的相关技术指标参数可知，YBL[®] 环氧树脂灌浆材料拥有便捷的配合比，方便现场操作。其次，其混合物粘度较低。如表 2 所示，室内大量的对比试验结果表明，采用 YBL[®] 环氧树脂灌浆材料处理 0.05 mm 宽度的细微裂缝具有较好的效果，室内采用沥青混合料弯曲后未完全断裂的小梁试件来检测灌浆处理的效果，待聚合物完全固化后弯曲至彻底断裂，可以根据侧面与断裂面的密封情况来判断其灌浆处理的效果，一般均能达到密封裂缝断面的 98% 以上。这对于降低裂缝处的应力集中是非常重要的。

由表 2 中的试验结果可知，对于宽度较小的裂纹，在温度较低的环境条件 (≤ 23) 下，采用初始粘度小于 300 cP 的密封粘结剂的灌缝处理效果比较理想，能够有效降低应力集中的可能性。

另外，YBL[®] 环氧树脂灌浆材料的壶粘时间较短，这对于现场操作的固化是比较有利的，但在混合操作时，应该注意避免由于聚合物堆积时间过长而导致粘度过大，达不到最佳的灌浆密封效果。

表 2 不同类型密封粘结剂灌缝效果对比

Tab.2 The filling effect of different types seals

种类	粘度/cP	缝宽/mm	温度/	灌缝处理效果 (粘结剂覆盖面积占总断面的百分比)
YL	800	0.05	23	80% -85% (密封效果较差)
LS	295	0.05	23	90% -98% (密封效果较好)
YBL [®]	75	0.05	23	100% (完全密封)
EY	1 800	0.05	23	0% -5% (基本不下渗)
YE	1 100	0.05	23	5% -10% (基本不下渗)
LB	180	0.05	23	100% (完全密封)
LW	230	0.05	23	95% -100% (密封效果较好)
LL	500	0.05	23	85% -90% (密封效果一般)
BE	1 580	0.05	23	0% -5% (基本不下渗)

为了检测 YBL[®] 环氧树脂灌浆材料的性能，可以通过拉伸试验、砂浆试件抗折强度试验以及粘结强度试验等进行测定。

3.2 拉伸试验

拉伸试验是反映聚合物灌浆材料的本质特性的方法，拉伸试验采用哑铃状试件进行 (图 2)。待试件完全固化后，测定其拉伸强度与断裂延伸率，试验条件为 23 ，速度拉伸为 500 mm/min。根据表 2 中的试验结果选取 LS、YBL[®]、LB 等 3 种粘度较低的灌缝材料，其拉伸试验结果如表 3 所示。



图 2 聚合物灌浆材料拉伸试件示意图

Fig.2 Test specimen of polymer filling materials

表 3 灌缝密封材料拉伸试验结果 (23)

Tab.3 The tensile test results of different seals (23)

种类	粘度/cP	拉伸强度/MPa	断裂延伸率/%	试验方法
LS	295	16.3	63	ASTM D638
YBL [®]	75	46.5	5.4	
LB	180	15.6	88	

由表 3 可知，YBL[®] 不仅粘度较低，而且其拉伸强度最高。

3.3 抗压强度

因为温度翘曲以及板底脱空等因素，水泥混凝土路面局部会承受压应力，因此，采用 YBL[®] 环氧树脂灌浆材料处理水泥混凝土收缩裂缝，要求灌浆材料必须拥有一定的抗压强度，以确保不会由于灌浆材料自身强度不足而导致灌浆处理失效。本文参照 ASTM D695 相关方法，测定材料自身的抗压强度，试验结果如表 4 所示。

按照我国混凝土规范 (GBJ10-89)，普通水泥混凝土的立方体标准抗压强度从 C7.5 到 C60 共 12

表 4 YBL[®] 灌浆材料抗压强度试验结果 (23)
Tab.4 The compression test result of YBL[®] seal (23)

特性	试验结果	试验方法
抗压强度/MPa	94.8	参 ASTM D695

强度等级,就 C60 号高强混凝土而言,表示其立方体抗压强度值达到 60 MPa。由表 4 可知,YBL[®] 环氧树脂灌浆材料的抗压强度值远远大于普通水泥混凝土的抗压强度值,因此不可能由于灌浆材料自身脆弱而导致灌浆处理失效。

3.4 粘结强度试验

优良的灌浆材料除了具备较高的强度指标外,还应该具备优异的粘结强度,能够确保与水泥混凝土等基层物质粘结牢固,达到补强的目的。为了评价 YBL[®] 环氧树脂灌浆材料与水泥混凝土的粘结性能,特此进行灌浆材料与水泥混凝土的粘结强度试验。试验为完全干燥状态条件下进行,试验结果如表 5 所示。

表 5 粘结强度试验结果(23)
Tab.5 The bond test result of YBL[®] seal(23)

特性	试验结果	备注
粘结强度/MPa	3.49	灌浆剂与水泥混凝土试件的界面破坏

3.5 水泥砂浆抗折试验

试验借助于 4 cm×4 cm×16cm 的标准尺寸水泥砂浆试件完成,选取 625 道路用硅酸盐水泥(28 d 抗折强度要求>8.5 MPa),先成型标准的砂浆试块,并置于标准养护室养护 28 d,测定其抗压强度。对断裂后的试件分别对断裂表面进行简单处理与不处理。在进行修复前先采用专用 StripSeal 贴胶片将断裂的三边密封,留抗折面进行灌缝处理。由于粘结剂粘度较低,灌缝完全依靠粘结剂重力进行灌注,并置于标准室温下固化 1 d,再测定其修复后的抗折强度值,试验结果如表 6 所示。

表 6 YBL[®] 修复水泥砂浆试验结果 (28 d)
Tab.6 Test result of cement slurry specimen filled with YBL[®] (28 d)

试件编号	初始抗折强度/MPa	修复后抗折强度/MPa	备 注
1	9.6	9.5	修复前断面不处理,旧断面砂浆剥落。
2	10.6	10.2	修复前断面不处理,旧断面砂浆剥落。
3	9.7	11.0	修复前清除断面浮粒,新断面断裂。
4	10.4	11.7	修复前清除断面浮粒,新断面断裂。

由表 6 可知,由于旧断面存在浮动砂浆屑,采

用修复后的抗折强度受到一定的影响,且从修复后砂浆试块的断裂面来看,破坏主要是由于砂浆浮粒影响了 YBL[®] 的粘结性能。但是其修复后的抗折强度均能达到原试件强度值的 96%,而从处理断面的修复强度来看,破坏均不发生在修复断面上,主要是因为在进行第 1 次抗折试验时,砂浆试块已经发生某种缺陷(如细微裂纹等),影响到了修复后的破坏位置。因此,如果条件许可,可以在实施灌缝操作前采用压力水冲洗工作区域的裂缝,以获得较佳的处理效果。

3.6 水泥混凝土抗折试验

水泥混凝土路面、机场道面结构均受弯拉为主,采用 150 mm×150 mm×550 mm 的标准尺寸水泥混凝土试件来验证修复后的抗折强度,以评定灌浆材料的修复效果。为了节约试验时间,标准条件下养护 14 d,再按照三分点加载方法测定其抗压强度。试验选取轻交通量等级的路面水泥混凝土材料,试验方法基本与水泥砂浆抗折试验类似,试验结果如表 7 所示。

表 7 水泥混凝土抗折试验结果(14 d)
Tab.7 The tensile test result of concrete specimen filled with YBL[®] seal(14 d)

编号	原混凝土梁抗折试验		修复后混凝土梁抗折试验 (2 d)	
	破坏荷载/kN	抗折强度/MPa	破坏荷载/kN	抗折强度/MPa
1	26.5	3.5	26.0	3.4*
2	33.5	4.5	23.5	3.2*
3	29.5	3.9	27.0	3.6*

注：* 为混凝土梁断裂均在新断面发生。

由表 7 可知,所有的混凝土梁的破坏状态均发生在新断面,由于混凝土梁已经经过第 1 次加载,局部可能存在某些细微裂纹,从而导致混凝土梁最终在新的断面发生开裂破坏。但从试验结果可以判定,灌浆剂的粘结强度要大于混凝土的抗折强度。

4 施工处理与质量控制

YBL[®] 高性能环氧树脂灌浆材料具有粘度较低、固化时间较短、强度大等优势,因此适合于现场修复类似于水泥混凝土收缩裂缝等对弯拉强度与粘结强度要求较高的病害处理。但为了取得优良的使用效果,还必须重视施工操作。

YBL[®] 高性能环氧树脂灌浆材料对水分特别敏感,水分不仅仅会影响灌浆环氧材料的粘结性能,而且会导致灌浆材料固化过快而无法达到最佳的灌缝效果。因此,在灌浆处理前需要严格确保裂缝内部没有水分,必要时应该采取红外线加热灯等设备

对潮湿的裂缝进行烘烤处理,彻底消除裂缝结构内部的水分。

由于YBL[®]聚合物的快速固化特性,要求施工时的材料温度不宜过高,如在炎热夏季施工,可以预先将YBL[®]聚合物的两组分材料置于温度较低的空调房间降温后再进行配置。施工时按照体积比配置YBL[®]聚合物灌浆材料,操作方便。配置完成后利用小型搅拌器进行充分搅拌约0.5~1 min。搅拌完成后将聚合物倒在裂缝区域,采用刮板等来回拖刮,以便于聚合物渗透。

虽然YBL[®]高性能环氧树脂灌浆材料固化时间较短,但是为了确保裂缝内的聚合物薄膜在通车前达到一定的强度,必须在开放交通前让环氧灌浆材料进行一定时间的固化,常温条件下(23℃)固化3~5 h,温度降低应该适当延长时间。

YBL[®]高性能环氧树脂灌浆材料的施工操作较为简便,对环境温度与机械设备要求较小。但是从最佳修复性能出发,环境温度越低,聚合物修复材料的粘度越低,其重力灌缝渗透效果较差。如没有压力灌注设备,建议施工操作的环境温度不低于5℃(过低的温度对于粘结剂固化不利)。从实际混凝土的抗折与抗压试验效果来看,YBL[®]高性能环氧树脂灌浆材料不仅仅适合处理裂缝宽度较小的收缩裂缝,对于水泥混凝土路面或桥梁的结构性受力裂缝也有较好的处理效果,因此,可以利用压力灌浆设备针对建筑结构物等出现的开裂进行灌浆处理。

在某些情况下,由于路面板结构内部无法避免的存在水分,因此,可以选取一种能够在潮湿条件下固化并具备较高强度的化学灌浆材料(LLB[®]、

LSB[®]等)。

5 结语

水泥混凝土变形能力差、容易产生应力集中等特点以及路面结构特性,大量水泥混凝土路面在使用期内出现病害,其中裂缝是最主要的病害形式。本文首先对水泥混凝土裂缝修复机理进行分析,通过大量的室内试验、分析比选得出综合性能最优的YBL[®]高性能环氧树脂灌浆剂作为理想的修复材料,最后运用工程实践,进一步研究了YBL[®]施工处理与质量控制,不仅为目前的水泥混凝土路面裂缝修复问题找到了较好的解决方案,也为新型修复材料的应用和试验提供了借鉴方法。

参考文献:

- [1] JTGD40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [2] JTJ073.1-2001, 公路水泥混凝土路面养护技术规范[S].
- [3] 战高峰, 苗若愚, 等. 水泥混凝土路面断板、破碎板维修方法试验研究[J]. 公路交通科技, 1998, 15(1): 19-21.
- [4] 刘振清, 黄卫, 等. 大掺量低质粉煤灰混凝土抗侵蚀性能分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 609-614.
- [5] ZHANG LEI, QIAN ZHENDONG. Axle-equivalent method of steel-deck pavement [J]. Journal of Southeast University, 2005, 22(1): 96-100.
- [6] 张继红, 霍健. 论水泥混凝土路面快速补修新工艺 [J]. 市政技术, 1995, (Z1): 80-81.
- [7] A SAMANTA, M MUKHOPADHYAY. Finite Element Static and Dynamic Analyses of Folded Plates [J]. Engineering Structures, 1999, 21: 277-287.
- [8] 黄卫, 钱振东. 高等水泥混凝土路面设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.