

预埋管混凝土裂缝灌浆修补技术试验研究*

全世海, 吴芳, 谢元亮, 徐仁崇, 李林, 王忠文

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要:预埋管混凝土裂缝灌浆修补技术,是混凝土裂缝修补技术中的一种新尝试,同时也为新型自愈合仿生混凝土材料的研究和开发作前期准备。测试了不同稀释剂、固化剂及增韧剂综合改性的环氧树脂多组配方灌浆液的性能,对通过预埋玻璃管模拟灌浆修补混凝土裂缝的效果与通过缝面灌浆修补混凝土裂缝的效果进行了比较。

关键词:预埋管; 混凝土裂缝; 仿生自愈合; 改性环氧树脂

中图分类号:TU528 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)01-0131-04

Experimental Study on Concrete Crack Repairing by Grouting through Embedded Pipe

QUAN Shi-hai, WU Fang, XIE Yuan-liang, XU Ren-chong, LI Lin, WANG Zhong-wen

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Repairing concrete crack through embedded pipe is a new attempt in the field of structure repairing and a preparation for a kind of intelligent concrete with self-healing capability. In this paper, the properties of fluid-modified epoxy resin containing different thinners, ethylamine and plasticizer were tested and the effect of fluid-modified epoxy resin in repairing concrete crack through embedded pipe was compared with that of conventional grouting.

Keywords: embedded pipe; concrete crack; biological modeling self-healing; modified epoxy resin

混凝土的裂缝,长期以来一直是学术界和工程界所研究的一个重要课题。国内外发表了大量的有关混凝土裂缝的成因、评估与修补的文献。混凝土裂缝是不可避免的,形成混凝土裂缝有许多原因。大量调查研究认为,混凝土裂缝的产生主要是由变形(包括结构因温度和湿度变化、收缩、膨胀、不均匀沉降等原因)及外荷载作用引起的。目前已经有多种评价、修补混凝土裂缝的方法,如往裂缝内灌水泥浆、环氧树脂;聚合物浸渍;缝合、钻孔填塞;布置限制钢筋;采用预应力钢索等^[1]。随着有机材料和高分子聚合物改性技术的不断完善,化学灌浆已成为修补混凝土裂缝的重要手段,特别是对于宽度在1 mm以下细而深的静止裂缝具有极为重要的技术价值,它可以较好地达到恢复结构整体性、耐久性、防水性的目的。目前常用的化学灌浆材料有环氧树脂类、甲基丙烯酸酯类、聚氨酯类^[2]。其中环氧树脂因其粘接强度高又相对经济而应用最为广泛,但环氧树脂的粘度较大,应用于宽度小于0.3 mm的微细裂缝时往往很难浸润渗透达到修补的目的,这时就要求有一种更为有效的修补技术

的支撑,以便让环氧树脂胶粘剂能够发挥它的最大效能。在日本、美国及国内有专家学者根据生物组织对受创伤部位自动分泌某种物质,而使创伤部位修复的原理,提出了混凝土裂缝仿生自修复的新理念,但大量的相关试验结果表明,该项新技术在材料的匹配、感知、识别和控制驱动等方面还存在技术上的不足,暂时还无法在实际工程中推广应用。本文提出的预埋管混凝土裂缝灌浆修补技术,是混凝土裂缝修补技术中的一种新尝试,同时也为研究和开发新型仿生自愈合混凝土材料作前期准备。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

化学材料:环氧树脂 E-44,分析纯,中昊产;甲苯,分析纯,重庆产;丙酮,分析纯,上海产;糠醛,分析纯,上海产;乙二胺,分析纯,重庆产;邻苯二甲酸二丁酯(简称 DBP),分析纯,重庆产;促进剂 DMP-30,分析纯,上海产。

水泥:重庆腾辉集团地维水泥公司生产的地维

* 收稿日期:2005-09-20

作者简介:全世海(1978-),男,湖北襄樊人,硕士生,主要从事混凝土裂缝研究。

42.5R 普通硅酸盐水泥。

集料:重庆渠河产特细砂,细度模数为 1.18;重庆南泉石灰石碎石,粒径 5~25 mm。

玻璃管:成都西南玻璃厂生产的中性(白)玻管,内径 2 mm,外径 4 mm。

钢丝:重庆德力冷拉钢丝厂生产的炭工 \varnothing 4 mm 冷拉钢丝。

1.2 试验方法

初始粘度:采用 RV 型旋转粘度计测定,测定温度 25 $^{\circ}$ C。

拉伸强度:试件规格采用 4 mm \times 10 mm \times 200 mm 纺锤体,按 GB/T2568-1995 在拉力试验机上测试。

压缩强度:试件规格采用 20 mm \times 20 mm \times 20 mm 立方体,按 GB/T2569-1995 在压力试验机上测试。

粘接拉伸强度:采用砂浆“8”型试件,先用拉力机拉断,将自配的胶粘剂涂于断裂面上,按原茬合拢。再沿缝面用蜡涂封以防浆液流失,然后用松紧带箍住,自然养护至胶粘剂固化作第二次抗折得粘结拉伸强度。

混凝土粘接抗折强度:试件采用 100 mm \times 100 mm \times 400 mm 配有钢丝的混凝土试块,将试块作第一次抗折后,缝面用石蜡密封(缝面灌浆试件预留注浆口和排气孔),从预埋管灌浆后自然养护到浆液固化(一般 7 d 左右)作第二次抗折得粘结抗折强度。

混凝土抗折强度损失率:本试验混凝土试件中预埋设有玻璃管,为统计分析不同强度等级不同龄期混凝土内置不同数量玻璃管后抗折强度的损失情况,提出了抗折强度损失率的概念。即,制备两组相同等

级的混凝土试件,养护相同龄期分别测定抗折强度,再据如下公式计算:

$$f_a = \frac{|f_0 - f|}{f_0} \times 100\%$$

式中: f_a 为抗折强度损失率,%; f_0 为未放置玻璃管所测抗折强度值,MPa; f 为放置玻璃管所测抗折强度值,MPa。

混凝土抗折强度恢复率:试验中的混凝土试件经过第一次抗折并人为控制产生一定宽度范围的裂缝后灌浆修复,修复后作第二次抗折,为测定修复程度,量化修复效果,提出了抗折强度回复率概念,即:

$$f_b = \frac{f_2}{f_1} \times 100\%$$

式中: f_b 为抗折强度回复率,%; f_2 为第一次抗折强度值,MPa; f_1 为修复后第二次抗折强度值,MPa。

2 化学灌浆材料的制备与性能

表 1 根据稀释剂品种的不同分为两组,其中甲苯为非活性稀释剂,只共混于树脂中,不参与树脂的固化反应。糠醛和丙酮复合能相互反应,并进一步树脂化,生成不溶的高分子,其效果类似活性稀释剂。由于糠醛和丙酮的粘度都很低,因而在灌浆中得到广泛应用并取得较好的效果。一般来说,浆液粘度越低,渗透性越好,可灌性也越好,但浆液固化后的强度会降低,因而稀释剂用量应综合考虑粘度和强度,表 1 的结果表明,甲苯适宜用量为 30~50(质量份),糠醛和丙酮复合适宜用量为 50~100(质量份)。

表 1 灌浆材料的配方和基本性能

配方编号	E-44 /g	DBP /g	甲苯 /g	糠醛/丙酮 /g	DMP-30 /g	乙二胺 /g	初始粘度 /mPa·s	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa	粘结拉伸强度/MPa
AB-1	100	—	30	—	—	8	60~70	>16.7	≥40	≥3.71
AB-2	100	—	40	—	—	8	50~60	>15.6	≥36	≥2.74
AB-3	100	10	50	—	—	8	30~40	>14.7	≥30	≥3.44
AB-4	100	—	—	25/25	5	20	100~120	>11.5	≥25	≥3.76
AB-5	100	—	—	50/50	5	20	30~40	>6.7	—	≥2.85
AB-6	100	—	—	80/80	5	20	20~30	>3.1	—	≥1.5

一般固化剂按用途可分为常温固化剂和加热固化剂两大类。但在土木、建筑中使用的胶粘剂加热困难,通常只能选用常温条件下固化的脂肪胺、脂环族胺以及低分子聚酰胺等。从固化剂的化学结构和固化反应机理分析,这类常温固化剂与环氧树脂发生的是加成聚合反应,固化剂本身参与到已形成的三维网络结构中,因此其加入量有一个合适的配比量。脂肪族多元胺固化剂的理论用量计算公式归纳为^[3]:

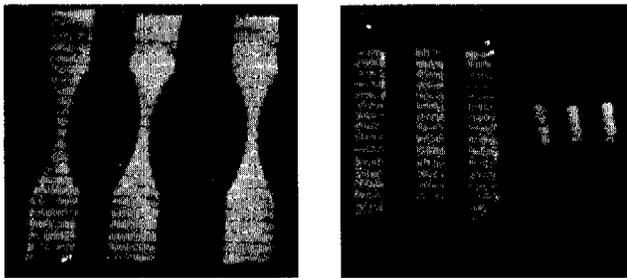
胺固化剂质量分数 = 胺分子量/氮原子上活泼氢数目 \times 环氧植。

例如:乙二胺的相对分子质量为 60,氮原子上有 4 个活泼氢,环氧树脂 E-44 的环氧值为 0.44,固化剂的理论用量 $G = 60/4 \times 0.44 = 6.6$ phr(每 100 份树脂中添加胺固化剂 6.6 份,下同),因为乙二胺的高挥发性,在实际应用中推荐用量为 8.0 phr。采用活性稀释剂时,因为活性稀释剂大都为环氧化合物,直接参与树脂的固化反应,应适宜增加固化剂的用量。综合粘结强度和粘度考虑,乙二胺固化剂在非活性稀释剂体系中的适宜用量为 8~10 phr,在活性稀释剂体系中需参考稀释剂的用量,一般不超过 20 phr^[4]。

DMP-30 是 2,4,6-三(二甲胺基甲基)苯酚的商品名,它是环氧树脂胶粘剂固化反应中重要的促进剂,常与聚酰胺配合使用。因为糠醛和丙酮体系的固化时间在 6 d 左右,在此处用作乙二胺的固化促进剂,加入 5 phrDMP-30 可减少固化时间 2~3 d。

DBP 是邻苯二甲酸二丁酯的简称,它不与浆液的主体成分发生化学反应但却可增加浆液的流动性,同时可使固化胶粘层伸长率、挠屈性、柔韧性提高,改善胶粘剂的物理机械性能。

通过对环氧树脂灌浆液适宜配方的选取和浇筑体基本力学性能的测试,树脂浇筑体力学性能测试标准试样如图 1 所示,综合考虑粘结强度和适宜的粘度,我们拟采用 AB-3 组配置浆液做以下灌浆修复试验。



(a) AB-3 树脂浇筑体拉伸标准试样 (b) AB-3 树脂浇筑体弯曲和压缩标准试样

图 1 树脂浇筑体基本力学性能测试标准试样

3 灌浆试验

3.1 预埋管混凝土的制备及灌浆工艺

按 JGJ55-2000 进行混凝土配合比设计,配合比见表 2。试验所选用的玻璃管具备合乎灌注需要的内径(2 mm)和适宜的壁厚(1 mm)保证其在机械振动中不被压碎而又能随混凝土的开裂而断裂。试验过程中

表 2 预埋管混凝土的配合比

强度等级	水灰比	砂率/%	水泥/kg	机制砂/kg	特细砂/kg	大石/kg	小石/kg	水/kg	减水剂/RH-8	坍落度/mm	抗压强度/MPa
C30	0.525	29	352	—	524	1 020	255	185	—	55	38.8
C40	0.427	34	426	234	351	910	227	182	—	60	48.1
C50	0.344	30	500	202	302	940	235	172	1%	55	57.2

3.2 玻璃管对混凝土强度的影响

因为需要预先埋设玻璃管于混凝土试件中,玻璃管的埋入可能增强或是削弱混凝土试件自身强度,试验通过对 C30、C40、C50 不同强度等级混凝土内置不同数量的玻璃管在不同龄期的抗折强度对比,得出混凝土试件随内置不同数量玻璃管的强度变化情况,试验结果见表 3,玻璃管的放置如图 3 所示:(其中 $L = 100\text{ mm}$, $L_1 = (1/3 \sim 1/2)L$, $L_2 = 1/2L$, $L_3 = 1/4L$,“o”所示为内置的玻璃管。)

实验结果表明:预埋玻璃管对混凝土构件造成了

采用尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 薄纸板,将其按玻璃管放置的取向和位置,预先钻孔穿入玻璃管,在浇筑混凝土试件分置于试模两端,边浇筑混凝土边插捣至混凝土填满试模,取出纸板再机械振动密实。为防止水泥浆体进入玻璃管堵塞管道,在浇筑混凝土时将外露的玻璃管口用塑料纸包扎封闭。

在选定了适宜的灌浆配方并制备出合乎要求的混凝土试件后,进行模拟试验,以探索和比较与之相适应的灌浆工艺是必要的。参照传统的缝面压力灌浆工艺,我们自己设计了更为便利的预埋玻璃管灌浆工艺:(1)基层处理。沿裂缝两侧 2~5 cm 的距离清除表面的灰尘、油污等。(2)封闭裂缝。试验采用经加热熔化后的石蜡封缝,视裂缝开展情况在试件裂缝缝面骑缝预留一个排气孔。(3)灌浆。注胶器针头插入玻璃管口注浆,直到浆液无法继续注入。(4)用蜡封住玻璃管口和排气孔,养护至浆液固化后清除表面残留物^[5]。试验中混凝土试件内置两根玻璃管和两根钢丝,结构示意图如图 2 所示。

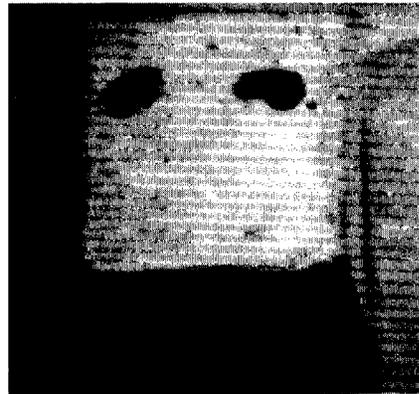


图 2 预埋管混凝土模拟灌浆结构示意图

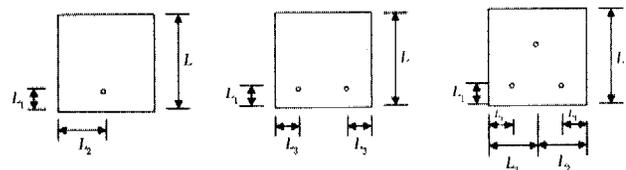


图 3 混凝土试件中内置不同根数玻璃管的横截面示意图
一定的影响,但可用其它方式来减小或抵消这种负面影响。例如,在混凝土配合比设计中,可按实际统计资料确定混凝土强度与水灰比间的关系曲线,根据曲线

确定施工水灰比,若无实际统计资料可在按 JGJ55 - 2000 进行混凝土配合比设计中,确定水灰比计算时的水泥 28 d 抗压强度实测值折减 10%,从表 3 可看出内 置玻璃管后混凝土强度损失率在 10% 左右。

表 3 预埋不同根数玻璃管对混凝土抗折强度的影响

预埋 玻璃管 根数	C30				C40				C50			
	7d 强度 /MPa	损失率 /%	28d 强度 /MPa	损失率 /%	7d 强度 /MPa	损失率 /%	28d 强度 /MPa	损失率 /%	7d 强度 /MPa	损失率 /%	28d 强度 /MPa	损失率 /%
0	7.11	0	8.16	0	8.06	0	9.35	0	9.00	0	11.54	0
1	6.83	3.94	8.00	1.96	7.68	4.71	8.61	7.91	8.48	5.78	10.98	4.85
2	6.21	12.66	7.88	3.43	7.38	8.44	8.39	10.27	8.48	5.78	10.71	7.19
3	5.85	17.72	7.76	4.90	7.28	9.68	8.08	13.58	8.25	8.33	10.37	10.14

3.3 灌浆试验的修补效果

混凝土裂缝修补效果的评价方法有多种,对以补强加固为目的的混凝土构件而言强度恢复率是一种最为有效的评价手段,我们采用配有钢丝的 100 mm × 100 mm × 400 mm 混凝土试件的抗折强度恢复率试验进行评价,试验结果如表 4。

表 4 混凝土粘结抗折强度

灌浆 工艺	混凝土 强度等级	第一次加载 开裂荷载 /MPa	第一次加载出 现的裂缝最大 宽度/mm	修复后加 载开裂荷载 /MPa	强度 恢复率 /%
预埋 玻璃管 灌浆	C30	7.86	0.16	5.07	64.50
	C40	9.24	0.24	7.47	80.85
	C50	10.08	0.32	10.01	99.31
缝面 灌浆	C30	8.33	0.41	4.16	49.94
	C40	10.17	0.42	6.66	65.46
	C50	11.33	0.50	8.30	73.25

试验结果可以看出:预埋玻璃管灌浆在比缝面灌浆获得更高的强度恢复率。在 C40、C50 混凝土的二次抗折中,大部分通过预埋管灌浆修复的试件裂缝没有在原裂缝处开裂,而是在其周围出现新的裂缝。而通过缝面灌浆修复的试件都是在原裂缝处再次开裂。

4 结论与展望

4.1 结论

1) 环氧树脂灌浆材料的配置需要综合考虑粘强度和粘度,一般而言,浆液粘度越低,渗透性越好,可灌性也越好,但浆液固化后的强度会越低,修复效果较好的粘度控制在 50 mPa · s 以下,“8”型水泥砂浆试件粘结拉伸强度在 3.0 MPa 以上。通过糠醛和丙酮复合做稀释剂虽然能获得较好的粘度,但常温固化时间在 6 d 以上,需要经过改性才能达到要求的粘结强度。

2) 玻璃管对混凝土自身强度的影响,不仅与玻璃管的数量有关,也与混凝土的强度等级和龄期有关,玻璃管的数量增加,混凝土的强度损失率增大,混凝土强度等级的提高和龄期的增加,强度损失率呈下降趋势。其中 C30 混凝土 7d 强度损失率最大值达到 17.72%。

3) 灌浆试验的结果表明,混凝土裂缝的修复效果

除与所选择的修补材料有关外,与混凝土裂缝的宽度和灌浆工艺都有一定关系,环氧树脂灌浆材料因其粘度高且波动性大,对不同宽度的裂缝会有不同的浸润效果,而不同的灌浆工艺,灌浆液又有不同的渗透方式,因而都直接影响着修复的效果,0.3 mm 以下的裂缝,预埋管灌浆修复效果明显好于缝面灌浆,0.3 mm 以上的裂缝,两种方式的修复效果相当。

4.2 展望

预埋管混凝土裂缝灌浆修补技术,是混凝土裂缝修补技术中的一种新尝试,通过灌浆试验表明预埋管混凝土裂缝修补技术比常用的缝面灌浆修补技术可节省工序,避免为安置灌浆嘴而照成对混凝土结构新的损伤。同时,预埋管灌浆修补液是从裂缝内部向外部渗透,受缝面处理效果的影响要小得多,在一些不安全或不方便接触的建筑物裂缝修补中也具有优势。这样比被动的裂缝产生后检查、判断再制定修补方案更快有效,适应了当前工程施工所倡导的绿色施工的要求,绿色施工是可持续发展战略在工程施工中的应用的主要体现^[6]。同时,预埋管混凝土裂缝修补技术可为新型仿生自愈合混凝土材料的研究作前期准备,具有重要的研究价值。

参考文献:

- [1] 蒋正武. 国外混凝土裂缝的自修复技术[J]. 建筑技术, 2003, 34(4): 261-263.
- [2] 买淑芳, 吴怀国. 互穿聚合物网络技术(IPN)制备新型化灌材料[A]. 重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [3] 贺曼罗. 环氧树脂胶粘剂[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [4] EG 型动载混凝土裂缝灌浆液的研究[A]. 重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [5] CECS25:90, 混凝土结构加固技术规范[S].
- [6] 竹隰生, 王冰松. 我国绿色施工的实施现状及推广对策. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(1): 97-100.