

水性环氧树脂改性桥梁混凝土增韧阻裂性能研究

林哲¹, 苟堡铭¹, 郭寅川², 周笑寒², 魏鑫², 尹磊²

(1. 陕西省高速公路建设集团公司 古镇高速公路建设管理处, 陕西 汉中 723500;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:普通桥梁混凝土抗弯拉强度低、脆性大、韧性差,在行车荷载作用下,桥梁构造物易产生开裂问题,不能满足现代交通对桥梁工程的使用要求,因此急需提高桥梁混凝土的抗裂性能。水性环氧树脂作为一种水溶性聚合物,不仅具有黏结力强、耐水、耐酸碱腐蚀、耐冲刷、抗渗性好等传统环氧树脂的特点,而且不含有机溶剂等污染物。将其应用于桥梁混凝土中,可以有效提高混凝土的弯拉强度与弯曲韧性,从而解决桥梁混凝土开裂问题,提高桥梁构造物的使用寿命。该文通过设计水性环氧树脂改性混凝土的抗弯拉强度与三点弯曲试验,通过强度(抗弯拉强度、弯曲韧性系数)、变形(挠度)、能量(断裂能)三方面对其增韧效果进行评价,再通过平板诱导开裂试验对其阻裂效果进行验证,最后通过微观分析方法,阐明水性环氧树脂改性混凝土的增韧阻裂机理。试验结果表明:水性环氧树脂的掺入可以有效提高混凝土的抗弯拉强度、弯曲韧性以及断裂能,与普通水泥混凝土相比,水性环氧树脂改性混凝土的7 d抗弯拉强度可提高20.4%,弯曲韧性和断裂能最高可分别提高42.7%、51.8%,水性环氧树脂主要通过改善孔结构、微纤维作用以及保水作用来提升桥梁混凝土的抗裂性能。

关键词:水性环氧树脂;桥梁混凝土;弯曲韧性;塑性开裂;增韧阻裂

中图分类号: U444

文献标志码: A

随着中国交通建设的快速发展,高速公路建设已由平原逐渐转向山区,特殊的山区地形致使桥梁构造

物占高速公路里程的比重越来越大。截至2019年末^[1],中国公路桥梁为87.83万座/6 063.46万m,比

证针对特殊箱梁设计措施的合理性。根据计算分析,得出以下结论:

(1) 不对称大跨度箱梁采用大小T构,其受力性能、施工稳定性基本能与对称大跨度箱梁持平,同时也简化了预应力布设。

(2) 对小跨边墩施加一定的集中压重,可以消除支座脱空问题。

(3) 采用双支座可避免支点截面出现拉应力,避免承台集中受力;对于受力不平衡的双支座,可以通过压重措施调节支反力。

参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 张喜刚. 大跨径预应力混凝土梁桥设计施工技术指南[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [3] 朱静. 不对称连续刚构桥受力分析[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [4] 王永锋. 216 m大跨非对称刚构连续梁合龙施工关键技术

术[J]. 铁道建筑技术,2020(3):69-72,77.

- [5] 喻文杰. 大跨径连续梁不对称悬臂施工若干问题探讨[J]. 铁道建筑技术,2021(2):93-96,131.
- [6] 翁方文,吴成,鲁祖泽. 大跨度不对称连续梁设计与施工关键技术[J]. 铁道建筑,2021,61(12):28-30,39.
- [7] 毛林. 多跨非对称连续梁桥施工控制研究和横向受力分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2020.
- [8] 陈建峰,李慧君,袁明,等. 非对称连续梁桥设计与施工[J]. 铁道工程学报,2006,23(9):31-35.
- [9] 鲍卫刚,周永涛. 预应力混凝土梁式桥梁设计施工技术指南[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [10] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [12] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2020-08-24

作者简介:林哲,男,硕士,高级工程师, E-mail:228896141@qq.com

2018 年增加 2.68 万座/494.86 万 m。但通过调研发现,桥梁构造物在运营期间,经常发生各种开裂、钢筋锈蚀外露以及表面构造物腐蚀等病害,对桥梁结构的耐久性及结构稳定性极为不利。究其原因主要是桥梁混凝土抗弯拉强度低、脆性大和韧性差等缺陷^[2-3],在交通荷载的频繁作用下,混凝土极易产生开裂,随之引发构造物腐蚀、钢筋锈蚀甚至外露等病害,尤其对于桥面铺装混凝土,直接承受行车荷载的作用,在车辆荷载作用下,如果混凝土没有足够的弯拉强度,桥面很可能发生断裂,因此如何提高桥梁混凝土的弯拉强度与弯曲韧性,从而改善其抗裂性,是提高桥梁结构稳定性的关键。

水性环氧树脂乳液^[4]是指环氧树脂以微粒或液滴的形式分散在以水为连续相的分散介质中而配制的稳定分散体系。它不仅具有黏结力强、耐水、耐酸碱腐蚀、耐冲刷、抗渗强度高等传统环氧树脂的特点,而且其易溶于水,不含有机溶剂和有害污染物,符合绿色环保的要求。由于这些特殊的性能,国内外学者将其应用于公路桥梁中,进行了大量的研究工作,Pang 等^[5]研究了两种水性环氧树脂[乳液型环氧树脂(EEP)和非乳液型环氧树脂(NEP)]加入水泥中对水泥水化和微观结构的影响,得出水性环氧树脂的层状网络结构可以改善水泥的孔结构,同时非乳液型环氧树脂(NEP)的加入增加了水泥的抗裂性;董健苗等^[6]利用聚苯乙烯(EPS)和水性环氧树脂对水泥材料进行改性,通过力学性能试验,以及微观扫描分析,得出 EPS 水性环氧树脂水泥基复合材料力学性能与黏结性能较普通水泥材料有了较大改善,同时由于水性环氧树脂成膜作用,可以形成连续致密的三维网状结构,改善水泥材料的韧性;Wong^[7]研究了聚合物改性水泥砂浆动力学性能,结果表明加入适量的水性环氧树脂乳液之后,可以增强改性砂浆抵抗动态荷载的能力,可用于行车荷载比较频繁的工程中;Choi^[8]研究表明当聚合物乳液掺量由 5%提高至 15%,同时固定水灰比为 0.38 保持不变,则混凝土的坍落度由 70 mm 增加至 210 mm,极大地改善了混凝土的流动性;叶超强^[9]研究了干燥环境及潮湿环境下使用的环氧树脂水泥砂浆,可以对路面局部破坏进行快速修补;Manuel 等^[10]研究

表明,水泥混凝土的增塑作用很大部分取决于环氧树脂乳液的黏结强度大小;李占全^[11]制备了一种用于桥梁加固的水性环氧树脂砂浆,通过相应的砂浆力学试验研究,数据表明其抗压、抗折以及黏结强度均比普通砂浆提高 30%以上。

综上,国内外学者针对水性环氧树脂水泥材料性能的研究,大多集中在用于修补材料的水性环氧树脂改性砂浆的工作性、黏结性以及力学强度等方面,而针对水性环氧树脂改性混凝土的力学强度、弯曲韧性以及抗裂性能,尚未开展系统的研究,另外关于水性环氧树脂对桥梁混凝土增韧阻裂的影响机理分析更是尚未涉及。基于此,该文通过对水性环氧树脂改性混凝土的抗弯拉强度、弯曲韧性、塑性开裂等性能进行研究,并借助 SEM 微观分析方法揭示水性环氧树脂对混凝土增韧阻裂作用机理。

1 试验设计

桥梁混凝土在车辆行驶过程中经常受到压应力和弯拉应力的双重作用,极易产生开裂、脆性断裂等病害,从而影响桥梁结构的使用寿命,因此,需对水性环氧树脂改性桥梁混凝土的增韧阻裂性能进行研究,该文通过设计水性环氧树脂改性混凝土的抗弯拉强度与三点弯曲试验,通过强度(抗弯拉强度、弯曲韧性系数)、变形(挠度)、能量(断裂能)三方面对其增韧效果进行评价,再通过平板诱导开裂试验对其阻裂效果进行验证,最后通过微观分析方法,阐明水性环氧树脂改性混凝土的增韧阻裂机理。

1.1 试验原材料

试验用水泥为普通硅酸盐水泥(42.5R),粗集料为 4.75~9.5 mm、9.5~19 mm 的石灰岩碎石,细集料选用河砂,细度模数为 2.70,外加剂为 HL-HPC3 聚羧酸高性能减水剂,消泡剂为 F111 型消泡剂,水性环氧树脂选用 WE-8231 型树脂,其具体技术指标如表 1 所示。

1.2 配合比设计

不同水性环氧树脂掺量(3%、6%、9%)下的改性混凝土配合比设计如表 2 所示。

表 1 WE-8231 型水性环氧树脂主要技术性能指标

环氧当量/ (g·mol ⁻¹)	外观	固含量/ %	黏度/ (MPa·s)	pH	主要用途
450~490	乳白色液体	50	8 000~15 000	6.5	环氧混凝土、环氧沥青

表2 水性环氧树脂改性混凝土配合比设计

强度等级	水灰比	组成材料/(kg·m ⁻³)					
		水泥	细集料	粗集料	水	减水剂	水性环氧树脂
C40	0.36	439	644	1 145	158	4.83	13.17
		439	644	1 145	158	4.83	26.34
		439	644	1 145	158	4.83	39.51

注: * 指消泡剂掺量为水性环氧树脂质量的0.5%。

1.3 试验方案

1.3.1 力学强度试验

根据JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》规定,混凝土抗弯拉强度采用100 mm×100 mm×400 mm的小梁试件,加载方式采用三分点加载,加载速率为0.02 MPa/s。抗压强度试验采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件。

1.3.2 三点弯曲试验

混凝土弯曲韧性试验采用日本混凝土标准JSCE—SF4规定的试验方法,试验仪器采用万能试验机,通过三点弯曲加载方式测试水性环氧树脂改性混凝土的弯曲韧性,试件规格为100 mm×100 mm×400 mm的小梁试件,加载速度0.02 mm/min,测试过程如图1所示,数据采集后,对试件的荷载—挠度进行分析,计算混凝土的弯曲韧性系数、断裂能。

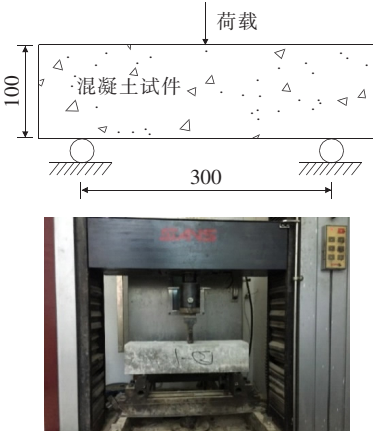


图1 水性环氧树脂改性混凝土三点弯曲韧性试验加载图(单位:mm)

1.3.3 平板诱导开裂试验

为研究水性环氧树脂改性混凝土在约束条件下的塑性开裂,借鉴美国密西根州立大学对混凝土大板开裂设计的测试方法^[12],塑性诱导开裂试验装置整体为薄板形平面结构,整体尺寸为500 mm×360 mm×70 mm,为了实现混凝土早期的开裂诱导,在原有装置的底部设置3根尺寸为360 mm×70 mm×60 mm的角

钢,使混凝土能在角钢位置更快地开裂,测试装置如图2所示。

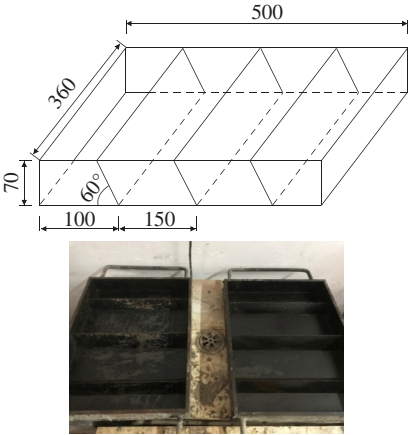


图2 水性环氧树脂桥梁混凝土塑性收缩试验模具(单位:mm)

塑性开裂试验步骤如下:成型C40水性环氧树脂混凝土板,抹面后在试件表面覆盖保鲜膜2 h,防止水分过早散失;2 h后撤去保鲜膜,将整个装置置于温度为(25±2)℃,湿度为(55±5)%的环境中;开启风扇和光照装置,以3~4 m/s的风速均匀平行地吹过混凝土表面,并同时记录开裂试验的时间观察裂缝的发展,记录第一条裂缝出现的时间,同时记录24 h内各混凝土板裂缝的条数、长度、最大裂缝宽度,当裂缝出现较大弯折时应分段测量长度,最终取其和;计算混凝土板上单位总开裂面积,计算公式为:

S=1/2A * sum_{i=1}^N (W_i * L_i)

式中:S为单位总开裂面积(mm²/m²);A为混凝土平板面积(m²);N为裂缝总数(条);W_i为裂缝i的宽度(mm);L_i为裂缝i的长度(mm)。

2 试验结果与分析

2.1 水性环氧树脂改性混凝土力学强度

图3为不同水性环氧树脂掺量下混凝土的7 d、28 d、60 d抗弯拉强度。

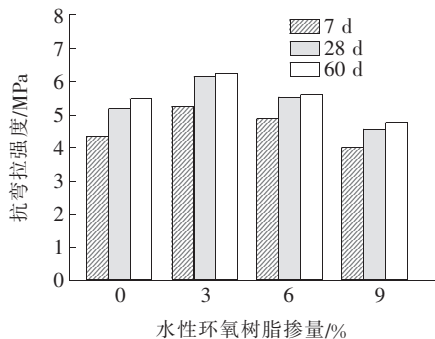


图3 水性环氧树脂改性混凝土抗弯拉强度

从图3可以看出:水性环氧树脂的掺入可以有效提高混凝土的抗弯拉强度,随着水性环氧树脂掺量的增加,混凝土的抗弯拉强度先增加后降低。当水性环氧树脂掺量为3%时,水性环氧树脂改性混凝土7 d、28 d、60 d的抗弯拉强度较基准组分别提高了20.4%、18.3%、14%,当水性环氧树脂掺量为6%时,水性环氧树脂抗弯拉强度开始下降,但较基准组,水性环氧树脂改性混凝土的28 d抗弯拉强度仍比基准组提高了6.6%。

水性环氧树脂的掺入可以提高水泥混凝土的抗弯拉强度,主要原因在于水性环氧树脂具有减水和成膜等效应,从而产生很好的改性效果。首先,水性环氧树脂具有很强的减水性,可以在保证混合料相同的条件下降低混凝土的水灰比,从而大幅度地提高其抗弯拉强度;其次,水性环氧树脂在水泥混凝土中会固化成膜,与其他聚合物乳液通过聚合物颗粒相互紧密堆积,最终黏结成膜的过程不一样。水性环氧树脂的固化成膜包括了水的蒸发、乳液颗粒的聚集、固化剂扩散和交联反应4个阶段,成膜过程既有物理变化,又有化学变化,这样最终形成具有一定强度与黏结力的膜,并穿插在水泥水化产物中,形成空间网状结构,从而提高其抗弯拉强度。

不同水性环氧树脂掺量下混凝土的7 d、28 d、60 d抗压强度如图4所示。

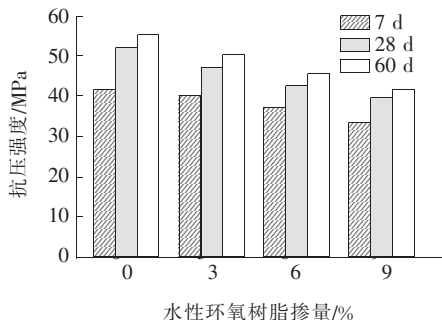


图4 水性环氧树脂改性混凝土抗压强度

由图4可知:水性环氧树脂改性混凝土抗压强度随着水性环氧树脂掺量的增加而单调减少,且水性环氧树脂对混凝土后期抗压强度影响较早期影响大。当水性环氧树脂掺量为3%时,水性环氧树脂改性混凝土7 d抗压强度只是略低于基准组,28 d、60 d的抗压强度较基准组分别下降了9.2%、8.8%,当水性环氧树脂掺量为6%时,水性环氧树脂改性混凝土7 d抗压强度也只是略低于基准值,28 d、60 d抗压强度较基准组分别下降了18%、17.9%,但水性环氧树脂改性混凝土的抗压强度仍然大于42.5 MPa,满足C40桥梁混凝土的力学强度使用要求。

水性环氧树脂掺入会降低混凝土抗压强度的原因在于,水性环氧树脂薄膜的弹性模量相较于混凝土弹性模量较低,掺入水泥混凝土中会成为内部的薄弱层,在混凝土受压时不能起到刚性支撑作用,从而导致混凝土的抗压强度有所降低。

2.2 水性环氧树脂改性混凝土弯曲韧性

2.2.1 荷载—挠度曲线分析

不同水性环氧树脂掺量下混凝土荷载—挠度曲线见图5。

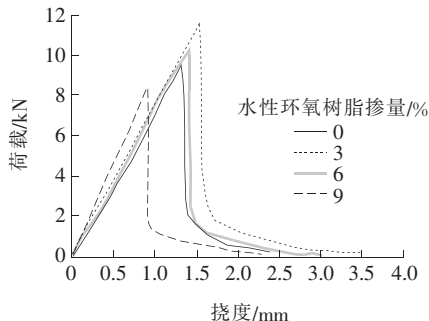


图5 水性环氧树脂改性混凝土荷载—挠度曲线

由图5可以看出:在加载的最初阶段,4组混凝土的荷载—挠度曲线均上升很快,荷载—挠度曲线变化趋势接近直线,此时荷载主要由水泥基材料承担。当继续施加荷载,水泥混凝土内部裂缝开始发展,普通水泥混凝土的极限破坏荷载为9.53 kN,而水性环氧树脂掺量为3%的混凝土极限破坏荷载为11.61 kN,相比普通水泥混凝土提高了21.8%,水性环氧树脂掺量为6%的改性混凝土,其极限破坏荷载相比普通水泥混凝土提高了7.97%,而当水性环氧树脂掺量增至9%时,水性环氧树脂改性混凝土的极限破坏荷载相较于普通混凝土降低了10.3%。随着荷载的继续增加,混凝土裂缝进入失稳阶段,荷载—挠度曲线呈现下降趋势,普通水泥混凝土的承载能力在达到极限荷载后

迅速下降,试件短时间内被完全破坏。水性环氧树脂改性混凝土虽然在达到极限荷载之后的初始阶段承载能力下降依然相对较快,但是下降一段时间之后,荷载的变化趋势逐渐趋于缓和。相比于普通混凝土,掺量为3%的水性环氧树脂改性混凝土的峰值荷载所对应的挠度提高了16.89%,完全破坏时的挠度提高了46.1%,这说明水性环氧树脂的加入,使得混凝土具有更强的变形能力。

2.2.2 弯曲韧性分析

针对材料的韧性评价,通常有以下几种标准^[13]:美国材料与试验协会(ASTM)、欧洲国际材料与结构协会(RILEM)、日本土木工程师学会(JSCE)。日本土木工程师学会(JSCE)采用弯曲韧性系数来表征混凝土的韧性,计算公式见式(2)。由于该标准计算方法简单,概念也很明确,因此该文选定JSCE提出的弯曲韧性系数对水性环氧树脂改性混凝土的弯曲韧性进行评价。

$$\bar{\sigma} = \frac{T_b L}{b h^2 \delta} \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为弯曲韧性系数(MPa); L 为两支座间的跨度(mm); T_b 为从开始到挠度为 $L/150$ 下的荷载—挠度曲线下的面积($N \cdot mm$); δ 为 $L/150$ (mm); b 为试件宽度(mm); h 为试件高度(mm)。

不同水性环氧树脂掺量下混凝土弯曲韧性系数如图6所示。

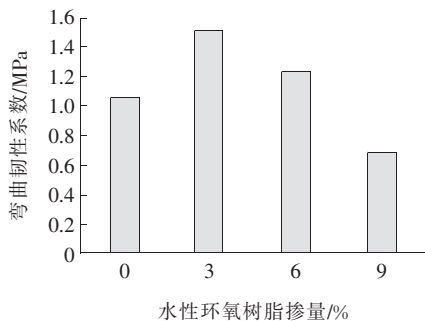


图6 水性环氧树脂改性混凝土弯曲韧性系数

由图6可知:水性环氧树脂的掺入,可以改善混凝土的弯曲韧性,随着水性环氧树脂掺量的增加,混凝土的弯曲韧性系数呈先增加后降低的趋势。相较于普通水泥混凝土,当水性环氧树脂掺量为3%、6%时,弯曲韧性系数分别增加了42.7%、15.8%。而当水性环氧树脂掺量增加至9%的时候,弯曲韧性则下降了34.4%,可知当水性环氧树脂掺量为3%~6%时,水性环氧树脂对混凝土的弯曲韧性提高比较明显。

水性环氧树脂薄膜,能够跨越混凝土内部原有微裂隙,起到阻裂和桥接作用,并吸收车辆的动载能量,防止微裂隙的扩展;水性环氧树脂薄膜的黏性很高,可以增加水泥与粗细集料之间的黏结性。上述几方面的综合作用均可以提高水性环氧树脂改性混凝土的弯曲韧性系数。

2.2.3 断裂能分析

断裂能反映单位面积裂缝扩展消耗的能量,表征材料裂缝扩展的难易程度,同时它也是反映混凝土抗变形能力的重要指标。断裂能的计算公式见式(3):

$$G_f = \frac{\left[\int_0^{\sigma_0} p(\sigma) d\sigma + mg\sigma_0 \right]}{(h - a_0)b} = (W_0 + mg\sigma_0)/A_{lig} \quad (3)$$

式中: W_0 为断裂功($N \cdot mm$); m 为试件在两支座之间的质量(kg); g 为重力加速度,取 $9.8 m/s^2$; σ_0 为最大挠度(mm); A_{lig} 为韧带面积(mm^2), $A_{lig} = (h - a_0)b$ 。

不同水性环氧树脂掺量下混凝土断裂能如图7所示。

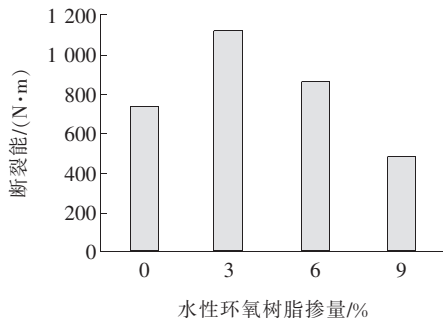


图7 水性环氧树脂改性混凝土断裂能

由图7可知:水性环氧树脂的掺入有效提高了混凝土的断裂能,增强了混凝土的韧性。相比于基准混凝土,水性环氧树脂改性混凝土的断裂能最高提高了51.18%,随着水性环氧树脂掺量的增加,混凝土的断裂能呈先增加后降低的趋势。与混凝土的弯曲韧性系数对比发现,两者之间的变化趋势一致。

水泥混凝土是一种典型的脆性材料,刚度过大和脆性过小等特性限制了其在桥梁工程特别是桥面中的应用,水性环氧树脂可以在混凝土中聚合成膜,水性环氧树脂薄膜相比于水泥、砂石具有更低的弹性模量和更好的柔韧性,从微观层面上来说,水性环氧树脂薄膜穿插在混凝土中,形成三维无序的网络空间结构,防止混凝土内部微裂隙的扩展和联通,有效减少了裂缝尖端应力集中的现象。因此,水性环氧树脂的加入可以有效改善水泥混凝土的韧性。

2.3 水性环氧树脂改性混凝土塑性开裂

参考 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》中抗裂性能等级划分(表 3)。采用单位总开裂面积 S 作为水性环氧树脂改性混凝土的抗裂性能的评价指标,开裂试验结果如表 4 所示。

表 3 混凝土塑性开裂等级划分

阻裂等级	$S/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	阻裂等级	$S/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$
L—I	$\geq 1\,000$	L—IV	$100 \sim < 400$
L—II	$700 \sim < 1\,000$	L—V	< 100
L—III	$400 \sim < 700$		

表 4 混凝土试件开裂试验结果

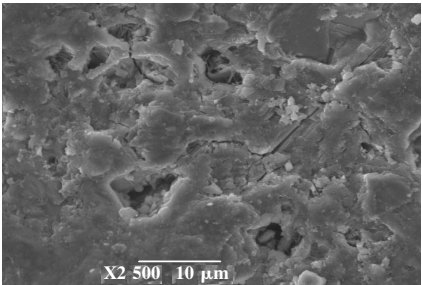
水性环氧树脂掺量/%	裂缝编号	起裂时间/min	最终宽度/mm	最终长度/cm	单位总开裂面积/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)
0	①	91	0.821	36.0	1 471.3
	②	101	0.672	32.8	
	①	105	0.793	36.0	
	②	116	0.772	33.4	
3	①	225	0.328	22.6	228.2
	①	234	0.353	24.9	
6	①	200	0.672	36.0	622.5
	①	205	0.573	36.0	
9	①	84	0.912	36.0	904.5
	①	96	0.897	36.0	

由表 4 可以分析出:由于模具设有裂缝诱导装置,所以在成型 24 h 后,基准混凝土与水性环氧树脂改性混凝土均出现了不同程度的开裂。基准组 C40 混凝土的早期开裂等级为 L—I,在掺入 3%、6%、9% 的水性环氧树脂后,其早期开裂等级分别变为 L—IV、L—III、L—II。同时,水性环氧树脂的掺入有效减少了混凝土板中出现第二条裂缝的可能性,对比基准组与水性环氧树脂组裂缝的宽度与长度可知,基准组裂缝宽度一般为 0.7~0.9 mm,且一般裂缝产生后即为贯穿裂缝,而水性环氧树脂组最少可将裂缝宽度控制为 0.3~0.5 mm。对比水性环氧树脂组与基准组的裂缝出现时间可以发现,水性环氧树脂可以有效延缓第一条裂缝出现时间,说明水性环氧树脂的掺入,对混凝土的早期塑性开裂起到了抑制作用。

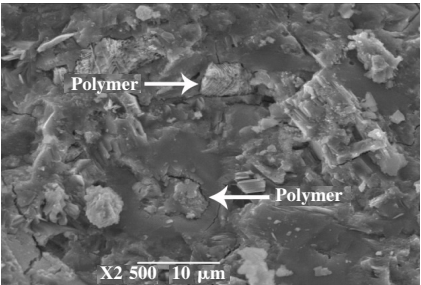
2.4 水性环氧树脂改性混凝土阻裂增韧机理分析

水性环氧树脂的掺入,可以提高混凝土的抗弯拉强度,改善混凝土的韧性,抑制混凝土的早期塑性开裂,通过水性环氧树脂混凝土的微观扫描电镜图,结合宏观的试验数据,分析水性环氧树脂对混凝土增韧阻裂的影响机理,主要体现在以下几个方面:

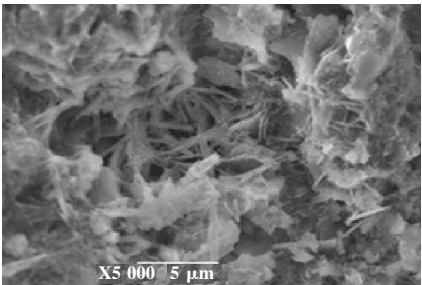
(1) 改善孔结构作用:由图 8(a)、(b)可以看出:相比于基准组,加入水性环氧树脂乳液后,水泥浆体中大孔减少,浆体结构更加致密,随着水泥凝胶结构发展,水性环氧树脂在水泥水化凝胶(包括未水化的颗粒)表面形成聚合物密封层,水泥浆体中较大孔隙被有



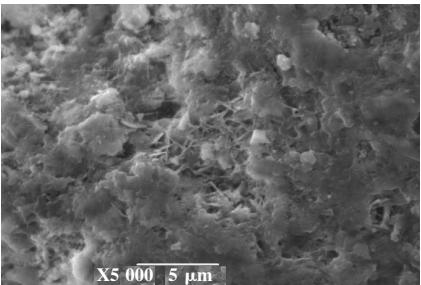
(a) 基准组混凝土试件放大 2 500 倍



(b) 3%掺量水性环氧树脂试件放大 2 500 倍



(c) 基准组混凝土试件放大 5 000 倍



(d) 3%掺量水性环氧树脂试件放大 5 000 倍

图 8 水性环氧树脂改性混凝土扫描电镜图

黏性的水性环氧树脂颗粒及水化产物所填充,混凝土更加密实,从而提高了混凝土的抗弯拉强度。

(2) 微纤维作用:图 8(c)、(d)表明:水性环氧树脂在混凝土内部成膜后,包裹住砂子和水泥颗粒,连接水泥各水化产物,同时形成的薄膜还填充了混凝土中的较大孔隙,改善了混凝土的内部缺陷,并形成了相互交织的聚合物膜网络结构,这种聚合物膜网络结构可以对混凝土内部薄弱区起到黏结作用,阻碍裂缝的发展,起到了类似于纤维的作用,这种“微纤维”作用提高了混凝土的韧性。

(3) 保水作用:水性环氧树脂会随着水泥的水化,在混凝土内部脱水成膜,形成水性环氧树脂薄膜。这种聚合物薄膜能够将体系中的自由水较好地锁在混凝土内部,减少了混凝土由于自由水散失而形成的收缩变形,在水性环氧树脂薄膜稳定后,对混凝土自身的收缩变形也能起到一定的约束作用,从而提高混凝土的抗裂性能。

3 结论

(1) 水性环氧树脂的掺入可以提高混凝土的抗弯拉强度,其抗弯拉强度随着水性环氧树脂掺量的增加,呈先增后降的趋势,3%掺量下水性环氧树脂改性混凝土 7 d、28 d、60 d 的抗弯拉强度较普通混凝土分别提高了 20.4%、18.3%、14%。

(2) 水性环氧树脂混凝土的荷载—挠度曲线可分为裂缝萌生、裂缝发展及裂缝失稳 3 阶段。在适当掺量下,水性环氧树脂可显著提高混凝土峰值荷载,并且可有效延长混凝土断裂过程中的塑性变化阶段,提高混凝土的弯曲韧性和断裂能。

(3) 水性环氧树脂掺入可以降低混凝土的开裂风险,有效减少裂缝的长度、宽度和单位开裂面积,并且延缓裂缝出现的时间,对桥梁混凝土的早期塑性开裂有显著的抑制作用。

(4) 水性环氧树脂主要通过改善孔结构作用、微纤维作用以及保水作用来提升桥梁混凝土的抗裂性能。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2019 年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2020(5): 40—43.
- [2] ZHAO Yuxi, YU Jiang, JIN Weiliang. Damage Analysis and Cracking Model of Reinforced Concrete Structures with Rebar Corrosion [J]. Corrosion Science, 2011, 53 (10): 3 388—3 397.
- [3] 潘慧敏, 马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 956—961.
- [4] 田甜. 水性环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [5] PANG Bo, ZHAN Yunsheng, LIU Guojian. Study on the Effect of Waterborne Epoxy Resins on the Performance and Microstructure of Cement Paste[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 831—845.
- [6] 董健苗, 曹嘉威, 李洋洋, 等. EPS 水泥基复合材料界面改性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6): 917—921.
- [7] WONG W G, FANG P, PAN J K. Dynamic Properties Impact Toughness and Abrasiveness of Polymer-Modified Pastes by Using Nondestructive Tests [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(9): 1 371—1 374.
- [8] CHOI P, YUN K K. Experimental Analysis of Latex-Solid Content Effect on Early-Age and Autogenous Shrinkage of very Early Strength Latex-Modified Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 396—404.
- [9] 叶超强. 水泥混凝土路面局部破损快速修补材料应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [10] SILVA M A G, SILVA Z C G, SIMÃO J. Petrographic and Mechanical Aspects of Accelerated Ageing of Polymeric Mortars[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 29 (2): 146—156.
- [11] 李占全. 浅析桥梁加固用水性环氧树脂砂浆[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(6): 36—39.
- [12] HENKENSIEFKEN R, BENTZ D, NANTUNG T, et al. Volume Change and Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Saturated Lightweight Aggregate under Sealed and Unsealed Conditions[J]. Cement and Concrete Composite, 2009, 31(7): 427—436.
- [13] 熊思慧. 混杂纤维混凝土韧性评价[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.