

甲烷有机硅改性水泥基材料修复农村公路路面技术研究

张 森¹, 何金峰²

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610299; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘 要: 随着农村经济的快速发展,大量基层公路面临快速抢修、防渗耐久、抗裂抗渗等修复工程。为探究有机硅改性水泥基材料对农村公路的施工修复效果,以填隙率为控制指标设计了不同掺量下单基团有机硅外加剂(甲烷硅酸钠, MAS)改性水泥材料,并应用于道路修复,通过单轴压缩试验、水滴接触角测试试验、电镜微观扫描(SEM)试验探究注浆加固后路面的宏观力学行为和抗渗防水微观机理。结果显示:公路结构强度随甲烷有机硅掺量的增加而不断降低,在初始强度损失不超过3.9 MPa下甲烷有机硅量掺量推荐不超过1.0%;当掺量控制在0.5%附近时,甲烷有机硅可显著提升改性加固刚度,修复后公路耐久承载能力可提高5.82%,抗渗防水能力可提升9.31倍。

关键词: 有机硅改性水泥;农村公路修复;抗渗防水性能;水滴接触角试验;电镜微观扫描

中图分类号: U418.6⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0353-07

Research on Repairing Technology of Rural Highway Pavement with Methane-organosilicon Modified Cement-based Material

ZHANG Sen¹, HE Jinfeng²

(1. China Municipal Engineering Southwest Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610299, China; 2. CCCC Second Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: With the rapid development of rural economy, a large number of grassroots roads are facing the rapid emergency repairs, anti-seepage and durability, anti-cracking and anti-seepage and other repair projects. In order to explore the construction and repair effect of organosilicone-modified cement-based materials on rural roads, the cement materials modified with single-group organosilicone admixtures (sodium methane silicate, MAS) of different dosages are designed with the gap rate as the control index and applied to road repair. The uniaxial compression test, water dropping contact angle test and scanning electron microscope (SEM) test are conducted to explore the macroscopic mechanical behavior and the microscopic mechanism of impermeability and waterproofing of the pavement after grouting reinforcement. The results show that the strength of highway structure continuously decreases with the increase of methane-organosilicon content. It is recommended that the methane-organosilicon content does not exceed 1% when the initial strength loss does not exceed 3.9 MPa. When the content is controlled about 0.5%, the methane-organosilicon can obviously improve the stiffness of modification and reinforcement. After the repair, the durable load-bearing capacity of the highway can be increased by 5.82%, and the anti-seepage and waterproofing capacity can be enhanced by 9.31 times.

Keywords: organosilicon-modified cement; repair of rural highway; anti-seepage waterproof capacity; water dropping contact angle test; scanning electron microscope test

0 引 言

随着农村经济的快速发展,大批量公路建设工程迅速铺开,给我国基层人民提供了生产生活的巨大便利^[1-2]。然而,由于农村地理分布位置及土基建

设的落后性,公路建设完成后经常面临旱涝、冻融、虫害等不同类别的灾害,加上施工质量和监管的缺失,导致混凝土结构的低耐久性成为公路运营维护的关键难题^[3]。大量农村公路均面临着快速抢修、防渗耐久、抗裂抗渗等修复工程,这就对新型混凝土耐久修复材料的研发工作提出了更高的要求^[4-5]。

现代道桥工程大量应用水泥基材料,其包含的多尺度孔隙特征是造成外来因素(如渗水、曝气、载

收稿日期: 2024-12-23

作者简介: 张森(1992—),男,学士,工程师,从事市政工程的施工设计方面的研究工作。

荷等)破坏材料骨架结构的主要原因^[6]。在现有混凝土及砂浆耐久性设计中,外加剂是改良孔隙结构、提高耐久性的重要产品^[7-8],其改性关键点在于深度参与水泥水化过程,在水泥多孔体系中引入和分散疏水性物质,进而优化孔隙分布并提高基质耐久性^[9]。其中,根据应用深度可划分为表面疏水改性和体积疏水改性,前者指在混凝土表面涂上疏水层,通过自然渗透作用对近表层孔隙结构进行改造,后者指在水泥生产过程中应用疏水外加剂,使得整个体积具备疏水性^[10-11]。对于农村公路而言,混凝土表面损坏非常普遍,若采用表面疏水改性方法将必然导致耐久修复质量降低,完全不具备长期实用性。因此,基于体积改性方法开发疏水外加剂是解决农村公路耐久修复工程的关键。

目前,众多学者研发了多种适用于水泥基材料的疏水外加剂,根据化学成分和作用机理可分为非反应性疏水化合物和反应性疏水化合物^[12]。前者以脂肪酸盐、硬脂酸酯等为代表,借助机械填充对不同尺度的孔隙进行密实进而阻水;后者以油酸酯、有机硅化合物等为代表,可以与水泥生料如石灰、铝酸三钙等反应生成疏水隔层进而隔水。其中,以有机硅化合物为基础的外加剂是近年来最具潜力的新型耐久修复材料,其含有的有机基团(如甲基或乙烷基)可以通过碳原子直接连接到硅原子上,与水泥基质间形成永久性的Si-O长键连接^[13],使得孔隙表面变得疏水,有效阻断混凝土内部渗流通道的同时保持原有的孔隙透气能力,进而提高混凝土结构的长期耐久性能^[14]。

然而,有机硅化合物或聚合物外加剂应用于传统硅酸盐水泥中时会显著影响混凝土实际强度。如Kalina等探究了聚二甲基硅氧烷(PDMS)对0.5水灰比下硅酸盐水泥防渗耐久性改良效果,发现掺入该外加剂后试样机械强度会立即下降50%,即便经28 d养护后强度降幅也达20%^[15];Spaeth等通过制备硅烷和硅氧烷基疏水性粉末作为砂浆改性外加剂,成功观察到砂浆抗压强度的提升^[16];而Milenkovovic等人则注意到2%的硅烷乳液会使水泥砂浆抗压强度降低18%^[17]。种种现象表明,有机硅外加剂的应用会导致水泥实际强度与设计强度发生偏差,偏差程度受有机硅外加剂的种类、添加浓度、物理形态等多种因素影响,且疏水基团甲基的链接状态也影响长期耐久性能,导致目前混凝土耐久修复工程中仍无法进行大规模应用,基于有机硅改

性实际工程应用与评估方面的文献仍很稀少。

综上,本文以单基团有机硅外加剂(甲烷硅酸钠,MAS)为研究对象,以填隙率为控制指标设计不同掺量下甲烷有机硅水泥修复材料并应用于道路修复,通过单轴压缩试验、水滴接触角测试试验、电镜显微观测(SEM)试验探究补强后混凝土路面的宏观力学行为和抗渗防水微观机理,进而优选出合适于农村公路修复的甲烷有机硅改性水泥基材料方案,为现实类似工程提供参考依据。

1 工程概况

某地区农村公路建设于2012年,路基与路面宽度分别为9、7.5 m。公路结构为双层碎石基层+填隙灰碎石基层+沥青混合面料表层。该农村地区白天日照时长为13 h,气候相对干燥,路面通车12 a以来多发生开裂、塌坑等,严重影响行人车辆安全,亟需对该类破坏现象进行修复,保证公路安全性。

本文选取该农村公路破损最严重的200 m中段部分作为示范案例,采用甲烷有机硅改性水泥基材料进行修补,通过监测不同有机硅掺量修补部位的强度变化趋势和修复后的防渗抗水能力来评价改性材料效果,进而得到合适的施工方案。

2 有机硅改性材料配方及路面修补技术

2.1 材料选择

(1)水泥

通过调研该农村公路原有施工记录和材料信息,水泥材料确定为P.O 42.5硅酸盐水泥,相应物理性能参数如表1所列。

表1 水泥材料相关物理性能参数

参数规格	设计数值
标准稠度用水量/%	30
初凝凝结时间/min	16
终凝凝结时间/min	45
标准强度养护周期/d	28
3 d抗折强度/MPa	3.5
28 d抗折强度/MPa	6.7
3 d抗压强度/MPa	12.5
28 d抗压强度/MPa	43.5

(2)有机硅外加剂

选择市售单基团甲烷有机硅——甲基硅酸钠(MAS)作为改性外加剂,浓度配置分别设置为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%四个梯度,以水泥质量百分比计算对应的MAS具体添加质量。

(3)粉煤灰

选择 S95 矿粉提取的 I 级低钙粉煤灰,粒径分布在 1~100 μm,相应的性能检测参数如表 2 所列。

表 2 粉煤灰化学成分参数

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
质量分数/%	52.60	26.20	9.4	3.5	1.2	5.0

(4)骨料砂

将现场采集的路基石料破碎成细骨料砂,粒径均匀分布在 1~10 mm,骨料相对密度为 2.58 g/cm³,质地性能均满足《农村公路水泥混凝土路面施工技术细则》中的相关标准^[17]。

2.2 改性水泥基材料配比与技术指标

为保证改性水泥材料充分发挥效果,采用材料填隙率 V_f 作为控制指标进行配比方案设计。该指标以水泥浆体积 V_c 和骨料密压堆积下的孔隙率 V_a 的比值进行定义,计算公式如下^[18]:

$$V_f = \frac{V_c}{V_a} \times 100\% \tag{1}$$

经测试在保证填隙率最大的条件下,不同甲烷有机硅掺量的改性水泥配比方案如表 3 所列。

表 3 有机硅改性水泥材料配比方案

试样编号	甲烷有机硅掺量 (wt%/水泥)/%	水:水泥:粉煤灰:碎石骨料
0#	0	
1#	0.6	
2#	1.0	15:40:6:25
3#	1.5	
4#	2.0	

得到目标配比后,按比例结果准备相应的原材料。制备过程中,先配置不同掺量的甲烷有机硅水,再同其他材料混入水泥浆液中。拌合过程以 1 400 r/min 的速率维持 5 min,以保证改性补强浆液成品有较好的流动性和灌入性^[19]。

此外,为了在实际公路修补利用中的应用效果,对所有成品浆液进行性能预测试,测试技术指标如表 4 所列。

表 4 甲烷有机硅改性水泥修复材料技术指标

指标类型	合格范围	测试结果
3 h 泌水率/%	≥15	19.2
7 d 干缩率/%	≤0.3	0.12
初始流动度/mm	10~15	13.3
30 min 流动度/mm	≤18	17.2
7 d 抗压强度/MPa	≥15	18.5
7 d 抗折强度/MPa	≥2	4.2

据表 4 结果所示,所制甲烷有机硅改性水泥浆液符合各项材料修复技术标准,可以用于农村公路的耐久性修复工程中。

2.3 路基修补技术工艺与试样制备

路基修补注浆工艺决定了公路病害处的修补好坏程度。基于甲烷有机硅改性水泥浆材料的注浆施工工艺包括^[20-21]:设点钻孔、注浆加固、铣刨重铺三个环节。具体施工流程为:路段围挡→布孔设计→定点钻孔→验孔校准→导管安装→开始注浆→停注拔管→封孔养护→取样检测→路面铣刨→遗害处理→洒布黏层油→摊铺碾压→抽点监测→开放交通。

因此,在封闭拟治处交通后,迅速准备好注浆工作台、改性水泥浆、钻孔器、钻芯取样工具等设备,正式施工前确保所有设备工作性能完好,并仔细核验甲烷有机硅改性水泥基材料技术参数。为避免浆液材料浪费,所有钻孔位置均采用浅层注浆,注浆深度为 0.9 m^[22]。

正式注浆开始后,先采用静力压降方式沿注浆导管开始注入,按先边缘后中央的顺序依次对各个注浆孔施行注浆。注浆过程时刻注意注浆压力仪表的指针变化,若注浆过程出现新增裂缝、路面鼓包、边沿漏浆等现象时应立即停止注浆,仔细检查封堵问题部位并待浆液凝固后重新开始注浆^[23]。

注浆完成 48 h 后,仔细检测路面压实度、厚度、平整度等参数,并利用钻芯工具在事先规划部位钻取现场真实试样,打磨加工成直径 50 mm、高 100 mm 标准圆柱试样,加工尺寸误差控制在 0.02 mm 以内^[24],中轴法线与断面水平误差不超过 0.25°,以用于后续室内单轴压缩试验、水滴接触角测试以及 SEM 观测试验。

2.4 室内试验方法

采用美特斯工业有限公司的 MTS 万能压力试验机对现场取得的改性水泥基注浆加固试样开展单轴压缩试验,如图 1 所示。加载前预应力设定为 0.25 kN,加载速率设定为 0.005 mm/s,压头最大推进位移设定为 0.1 mm。加载过程中实时记录应力位移曲线,当抵达试样峰值应力时停止加载。如图 2 所示,借助水滴接触角试验仪测试不同掺量有机硅注浆加固试样的防水抗渗性能,借助 Quanata™ 250 扫描电子显微镜对各个试样进行微观扫描实验,研究不同掺量下甲烷有机硅对注浆加固试样微观结构的影响。

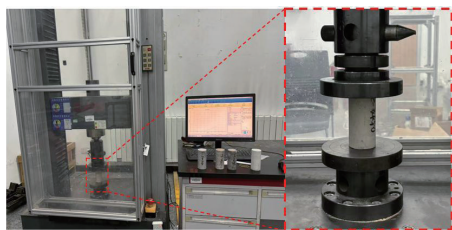


图1 室内单轴压缩试验

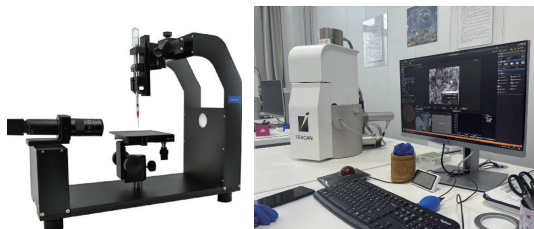


图2 水滴接触角试验仪及Quanata™ 250扫描电子显微镜

3 甲烷有机硅改性加固效果与分析

3.1 抗压强度

图3所示为不同甲烷有机硅掺量下公路注浆修复样品单轴抗压强度的变化趋势。可以看出,甲烷有机硅改性加固强度随着掺量比的增加而不断降低,这说明甲烷有机硅影响了浆液水化凝结强度,导致相同条件下试样力学性能不断劣化,这在杨旭光、闫大伟等人的研究中也有类似现象报道^[25-26]。为了进一步衡量不同掺量对强度的影响规律,图4给出了相应掺量区间下的强度变化值。可以发现,对比原始加固试样,添加0.5%甲烷有机硅对加固试样的强度影响不超过1 MPa,而一旦添加到1.0%的甲烷有机硅时,强度降幅将达3.9 MPa。同时,这一趋势并没有因为随着甲烷有机硅掺量比的上升而得到减缓,相反在添加2.0%时强度折减量超过了10 MPa,这对于农村公路修补工程是不可接受的。因此,为保证修复公路结构具备足够的承载能力,用于注浆加固的改性水泥基材料相应的甲烷有机硅添加量建议不超过1.0%。

3.2 应力应变行为

不同甲烷有机硅掺量下注浆加固路面试样的单轴压缩应力应变曲线如图5所示。根据曲线变化斜率可以发现,所有试样在达到峰值应力前均经历了非线性段—初始压密变形和线性段—线弹性变形。同时,当着甲烷有机硅掺量比超过0.5%后,试样峰值应力随着掺量比的增加不断降低,临近峰值点附近的曲线斜率逐渐平缓,这意味着试样弹性变形段和塑性变形段的临界点:弹性极限强度会在甲烷有机硅掺量超过0.5%后而不断下降,导致试样弹性变

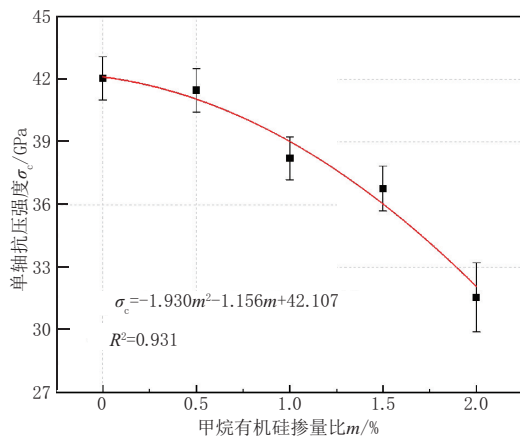


图3 不同甲烷有机硅掺量下试样抗压强度变化

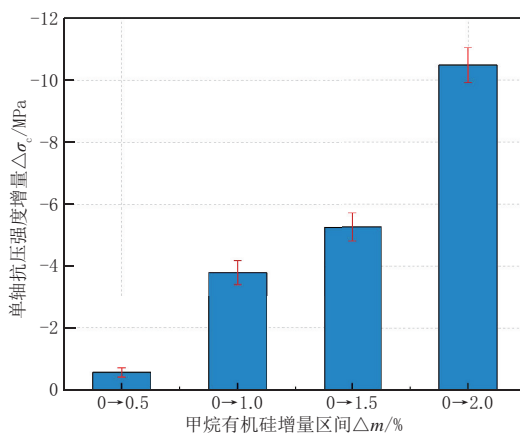


图4 不同甲烷有机硅区间下试样抗压强度增量变化

形能力不断降低,塑性变形能力愈发明显。对于面临大量日常车辆、人员负载的农村公路而言,弹性极限强度越高意味着路面损坏对应的最小荷载越大,结构长期承载能力越强^[27-28]。因此,选择弹性极限强度较高的有机硅改性方案更有利于公路长期服役性能。

为了进一步说明改性加固修复公路结构的有效承载能力变化,图6给出了不同甲烷有机硅掺量下试样弹性模量的变化趋势。可以看出,在0.5%甲烷有机硅掺量下试样弹性模量可达6.82 GPa,比原始公路结构提高0.37 GPa,提升比例达5.82%。而当掺量比达到1.0%时,弹性模量迅速下降到6.19 GPa,相比原始公路结构降低近4.16%,且随着甲烷有机硅的增加弹性模量持续降低。这表明0.5%甲烷有机硅虽然导致试样整体强度下降,但提高了改性加固的刚度,使得路面耐久破损能力得到显著提高。因此,从提高有效承载力、防范路面破损变形的角度来看,本研究中农村公路所用的甲烷有机硅推荐修复掺量应在0.5%附近。

3.3 抗渗防水性能

在农村公路长期使用过程中,气候降水、地势水

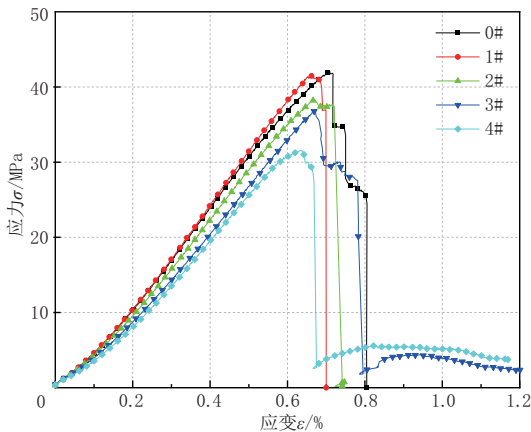


图5 不同甲烷有机硅掺量下试样应力应变曲线

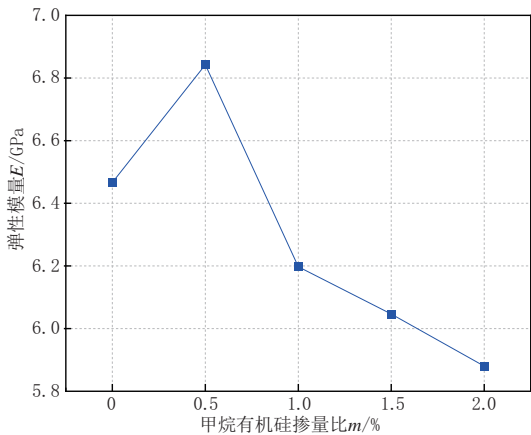


图6 不同甲烷有机硅掺量下试样弹性模量

注、土壤水侵蚀等是影响公路服役寿命的关键因素,研究甲烷有机硅改性条件下公路结构的抗渗防水性能尤为重要。水滴接触角试验是衡量固体材料表面润湿性能的重要方法,其反应的固液接触角参数可以综合反应物质的抗渗防水性能,已广泛应用于医药材料、芯片产业、浮选工业等领域^[29-30]。

图7所示为不同甲烷有机硅掺量下改性加固试样的水滴接触角试验结果图。可以发现,水滴接触角度随着甲烷有机硅掺量的增加先上升后降低:注浆加固公路表面的水滴接触角从原始的12.07°提高到当掺量为0.6%时的112.4°,抗渗防水能力提高近9.31倍;当甲烷有机硅掺量为1.0%时达到最大水滴接触角125.52°;随后其值开始下降,直到2%掺量下的48.52°。根据液固接触角分类标准,水滴接触角小于90°时表明材料是亲水性的,大于90°则材料表现为憎水性^[31]。因此,甲烷有机硅的加入可以迅速介入水泥水化反应,在试样内部生成并散布疏水性的化合物,显著改变材料的表面润湿性能。同时,高掺量的改性加固试样润湿性能降低也说明加入过量的甲烷有机硅会破坏原有的孔隙结构,导致表面孔隙的毛细现象明显上升,结构抗渗防水能力显著下降。

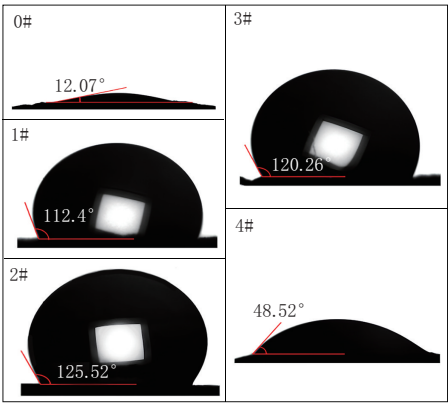


图7 不同甲烷有机硅掺量下试样水滴接触角变化

3.4 微观结构特征

为了进一步探究甲烷有机硅掺量对试样宏观力学特性和抗渗防水能力的微观影响机理,本节针对前章节中的0.5%推荐掺量甲烷有机硅试样和2.0%过度掺量甲烷有机硅试样进行微观扫描试验,通过对比原始试样微观结构,分析这两种不同掺量水平下试样的结构特征,进而总结出甲烷有机硅外加剂对公路修复结构的微观影响规律。

如图8所示,未添加甲烷有机硅的SEM图中试样表面胶结良好,仅有少量因不均匀水化而导致的接触界面裂隙和孤立孔隙。加入0.5%的甲烷有机硅后,试样胶结有所减弱,对应的SEM图中发现了更大的裂隙和空洞,不同缺陷处的裂纹呈现出相互贯通的趋势,但整体水化产物分布和桥接没有明显变化。结合宏观实验中观察到的抗压强度降低、弹性模量上升、水滴接触角增大等现象,可以解释为该推荐掺量下虽然孔隙有所扩增,但试样内部孔隙结构均匀度也得到了提升,孤立孔隙数量并没有受到明显影响,孔隙间的连通性和试样整体渗流通道变化不大,再加上基质疏水性因甲烷有机硅的加入而有显著提升,从而形成了更好的结构刚度和抗渗防水性能。相比之下,加入2%过量甲烷有机硅后,试样胶结急剧恶化,表面孔隙大小和裂纹深度明显发育,导致整体强度、刚度和防水能力急剧下降。因此,用于农村公路修复的甲烷有机硅水泥材料应充分考虑基质疏水性和孔隙结构均匀性,通过控制掺量比保证两者均处于合理范围,从而提高相应的现场施工应用效果。

4 公路破损修复评价

综合前文研究结论,采用0.5%甲烷有机硅配置改性水泥基注浆材料,并大规模应用于剩余破损路

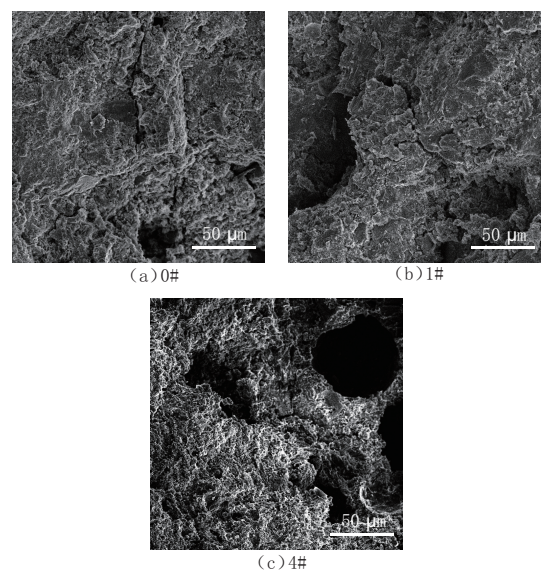


图8 不同甲烷有机硅掺量下试样微观结构

段的修复工程。待工程完毕后开放公路并进行为期一个月的公路试运行,统计试运行期间公路的破坏

表4 改性修复前路面损坏扣分指标

序号	损坏类型		损坏密度 /%						DR 值
			0.01	0.1	1	10	50	100	修复前/后
1	裂缝类	线裂	2	4	8	16	35	52	52/8
2		网裂	5	7	11	20	46	72	72/11
3		龟裂	9	10	14	22	55	76	76/9
4	变形类	拥包	3	11	15	30	55	80	80/10
5		车辙	7	18	22	27	50	65	62/1
6		沉陷	3	5	15	24	47	55	55/5
7		翻浆	10	12	25	66	74	82	82/7
8	松散类	剥落	2	8	12	24	40	54	54/0
9		坑槽	10	25	34	40	65	77	77/1
10		啃边	2	4	8	12	28	36	36/0
11	其他类	路况差	3	8	18	20	20	20	20/0
12		唧浆	5	8	16	30	48	75	75/1

可以看出,在考虑不同损坏面积的情况下,4类损坏类型的密度在改性修复后都得到了很好的控制,原本影响最大的翻浆、拥包、龟裂等破坏密度都被有效控制在10%以内,12类常见公路破坏的PCI值均在80分以上。表明所采用的甲烷有机硅改性公路修复材料能很好地应用于本文所研究的农村公路修复工程。

5 结 语

为探究甲烷有机硅改性水泥基材料对农村公路的施工修复效果,本文借助单轴压缩试验、水滴接触角试验和SEM微观扫描试验对不同掺量下甲烷有机硅改性水泥注浆修复后的公路钻芯试样开展研究,并对其修复加固后的效果进行分析。本文主要结论

情况,便于进行修复效果评价。
为标准化评价改性修复前后公路的服役效果,根据中华人民共和国《城镇道路养护技术规范》(CJJ 36—2016)中关于路面破损状况的评价思路,选择路面破损状况指数(PCI)对改性前后的农村公路进行破损修复定量评价。PCI具体计算方法如下:

PCI = 100 - DR (2)

式中:DR为路面综合扣分值,其值通过实际调研4类基本路面破损类型,统计每类破损中的单项扣分值进行综合打分。具体计算思路如下:首先通过计算路面破损密度,得到单项扣分值;然后根据单项扣分值计算权函数因子,进而计算单项权重,得到单类扣分值;最后根据单类扣分值计算权函数因子,进而计算单类权重,得到综合扣分值DR^[32]。

通过上述方法,可得出改性修复前后农村公路路面的4类12项路面损坏扣分值,如表4所列。

- 如下。
- (1)随着甲烷有机硅掺量的增加,修复公路结构强度不断降低,为保证初始强度损失不超过3.9 MPa,推荐甲烷有机硅量掺量不超过1%。
 - (2)当甲烷有机硅掺量超过1%后,修复公路结构的弹性模量急剧下降,但当其掺量控制在0.5%附近时,改性加固的刚度提升近5.82%,相应公路修复后的耐久承载能力可得到显著提高。
 - (3)甲烷有机硅的增加可显著提高修复公路结构的基质疏水性,但仍需结合孔隙结构均匀性进行综合考量,以期同时满足农村公路的载荷承载力和抗渗防水性能要求。
 - (4)工程修复发现,0.5%最佳掺量甲烷有机硅改性水泥修复材料可将翻浆、拥包、龟裂等破坏类型有

效控制在10%以内,在1个月的修复公路试运行期间,12类常见公路破坏类型的PCI值均在80分以上。

参考文献:

[1] 刘秀,杨锦涛,杜明霖,等.农村公路建设与社会经济发展的互动效应分析[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2024,40(6):87-94.

[2] 劳荣波.农村公路运输经济的困境与对策[J].大众投资指南,2024(2):146-148.

[3] 中华人民共和国国务院办公厅.新时代的中国农村公路发展[N].人民日报,2024-11-30(6).

[4] 林娟.新经济背景下农村公路养护管理的问题研究[J].运输经理世界,2022(20):137-139.

[5] 杨鹏鹏.农村公路建设对农村经济发展的影响分析[J].山西农经,2021(11):180-181.

[6] 李欣泽.道桥施工中软基加固技术的应用研究[J].四川水泥,2022(1):243-244.

[7] 马裕添.浅谈混凝土外加剂及其应用[J].城市道桥与防洪,2010,(8):44-47.

[8] 曹晓婧,陈斌.不同矿物外加剂对C30引气混凝土耐久性的试验研究[J].城市道桥与防洪,2014(3):146-148.

[9] 王超.关于改善混凝土结构整体性能防水方法[J].大众标准化,2021(12):138-140.

[10] 林志平.浅谈大体积混凝土防水抗渗技术措施[J].河南建材,2018(6):287-288.

[11] 董建忠.表面疏水剂对混凝土中水和氯离子渗透效果的研究[J].水利技术监督,2024(2):148-150;204.

[12] Grabowska K B, Koniorczyk M. Internal hydrophilization of cementitious materials by using of organosilicon compounds.E3S Web of Conferences, 2020(172): 14006.

[13] 冯博文,刘杰胜,陈耀华,等.有机硅水泥水化作用及基本性能研究[J].有机硅材料,2022,36(2):5-11.

[14] 丁伟正,朱洪威.有机硅憎水剂和硅烷浸渍剂对透水混凝土性能的复合影响[J].江西冶金,2023,43(6):533-540.

[15] Grabowska K B, Koniorczyk M. Influence of organosilicon admixtures the hydration of Portland cement. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 147(11): 6131-6145.

[16] Spaeth V, Delplancke M. Hydration process microstructure, development of integral water repellent cement based materials[J]. Advanced Materials Research, 2013(100): 687.

[17] 胥明诚.农村公路水泥混凝土路面施工技术[J].中国水泥,2024(9):121-123.

[18] 瓦智永.聚合物改性水泥基复合材料公路路面快速修补技术探讨[J].四川水泥,2024(11):202-204.

[19] 夏枫,殷威.水泥混凝土路面的常见病害及其修复措施研究[J].城市道桥与防洪,2018(4):47-50.

[20] 张伟.水泥混凝土路面断面改造及加铺方案研究——以金巢大道为例[J].城市道桥与防洪,2023(8):53-55.

[21] 张阳,李小龙.新型复合水泥—水玻璃注浆材料在沥青路面水稳基层病害处治中的应用及工艺研究[J].交通世界,2023(8):19-21.

[22] 张顺.压密注浆碎石桩在道路工程软基处理中的应用[J].四川水泥,2023(5):223-225.

[23] 张兴光.注浆技术在公路桥梁路基施工中的应用[J].交通世界,2018(12):38-39.

[24] GB/T 50266—2013,工程岩体试验方法标准[S].

[25] 杨旭光.有机硅防水剂在桥梁混凝土防撞护栏防腐中的应用[J].黑龙江交通科技,2014,37(6):110-112.

[26] 闫大伟,孙明赫,王静,等.有机硅在混凝土保护中的试验研究[J].节能,2012,31(4):10-12.

[27] 郑亚迪,王宁宁,杨红娟,等.有机硅防水剂改性高强度混凝土及性能研究[J].盐科学与化工,2023,52(9):9-13.

[28] 李传习,王圣杰,夏雨航,等.硅烷改性超高性能混凝土的流变性和强度[J].硅酸盐学报,2023,51(11):2914-2923.

[29] 邱岳,杨一帆,于大川,等.低温和湿度对超疏水表面水滴接触角的影响[J].实验流体力学,2024:1-6.

[30] 邓亚骏,徐蕾,卢海龙,等.油气储层长石矿物表面水滴接触角[J].科学通报,2018,63(30):3137-3145.

[31] 郭树虎,于志家,罗明宝,等.超疏水表面润湿理论研究进展[J].材料导报,2012,26(5):74-78.

[32] 张波.城镇道路沥青路面破损状况指数(PCI)计算方法研究[J].交通科技与管理,2024,5(3):164-166.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

