

复合型内养护材料对公路水泥砼性能影响研究

栗威^{1,2,3}, 张永军³, 黄凯希^{1,4}

(1.广西道路结构与材料重点实验室, 广西南宁 530023; 2.长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室, 湖南长沙 410004; 3.河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南郑州 450005; 4.广西交通职业技术学院, 广西南宁 530023)

摘要: 通过力学性能试验、抗渗性能试验与早期抗裂试验对掺加不同内养护材料的砼进行分析, 研究内养护技术对公路用水泥砼性能的影响。结果显示, 内养护技术可显著改善砼的抗渗性能和早期抗裂性能, 对抗压强度、回弹模量则存在劣化作用, 且随材料掺量的增加对砼的作用效果逐渐增加; 自主研发的复合型内养护材料 CICA 对砼抗渗、抗裂性能的改善效果优于 SAP 和轻骨料, 且在合理用量范围内其对抗压强度、回弹模量的劣化作用较弱; CICA 对公路水泥砼内养护效果显著, 通过均匀持续补偿内部水化用水改善砼内部微环境, 抑制收缩变形, 提高其耐久性。

关键词: 公路; 水泥砼; 复合型内养护剂; 力学性能; 抗裂性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)02-0097-05

水泥砼路面由于路面结构的特殊性 & 施工过程中易受到环境(地面—环境温差作用)等因素的影响而产生早期收缩、开裂及应变—应力集中等问题, 进一步劣化路面的耐久性。基于水泥砼内部结构水化过程定义、理论模型推导, Philleo 于 1991 年提出内养护(internal curing)的概念, 2001 年 ACI(American Concrete Institute)将内养护定义为源于砼内部结构中额外水而非拌和用水进一步促进的水泥水化过程。

目前在内养护材料方面的研究集中在超吸水树脂(SAP)和多孔轻骨料两大类。叶华、朱长华等的研究表明合理掺加 SAP 可降低砼早期变形, 提高其抗收缩、抗裂及水泥水化能力, 但会降低其力学强度性能; 周宇飞提出了 SAP 砼内部相对湿度与自收缩之间的关系模型, 验证了 SAP 材料的性能; 陈瑜分析了两种预湿轻骨料对砼的内养护作用效果, 提出预湿轻骨料的有效水胶比对砼结构力学强度起决定作用; 胡曙光等指出掺加胶凝材料用量 0.5% 的预吸水 SAP 对砼早期(7 d)强度的影响较小, 但会显著降低后期强度, 当 SAP 释放出有效水时会在砼内部结构中形成微细、蜂窝状孔洞, 砼受到力作用时将在微孔洞处造成应力集中, 进一步引起微裂纹产生与发展。以上关于砼内养护技术的研究偏向于内养护材料对砼工作性能、收缩性能及强度等宏观性能的影响, 而对公路用砼的研究鲜有涉及, 且目前内养护技术还没有进行规模化应用。该文在以往研究成果的基础上, 结合公路水泥砼路面的结构特性, 通过力

学性能、抗渗性能和早期抗裂性能试验, 分析内养护材料对公路水泥砼性能的影响, 为实体工程应用提供技术支持。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

水泥为双龙水泥集团生产的 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 其技术性能见表 1; 细集料为河砂, 细度模数为 2.7, 含水率为 4.21%; 粗集料为河南贾峪生产的 5~25 mm 连续级配碎石; 外加剂为上海麦斯特建材有限公司生产的聚羧酸系减水剂 SP8; 外掺料为粉煤灰, 其基本性能见表 2。

表 1 水泥的基本性能

试验项目	试验结果	
标准稠度用水量/%	24.1	
初凝时间/min	157	
终凝时间/min	218	
比表面积/(kg·m ⁻²)	387	
安定性	合格	
抗折强度/MPa	3 d	58
	28 d	67
抗压强度//MPa	3 d	33.1
	28 d	50.7

高分子吸水树脂(SAP)为由北京汉力森新技术有限公司生产的丙烯酸—丙烯酰胺共聚物, 细度为 80~120 目; 轻骨料选择圆球形黏土陶粒, 粒径为 5~20 mm 连续级配; 复合型内养护材料(Composite

表2 粉煤灰的基本性能 %

试验项目	试验结果	试验项目	试验结果
烧失量	2.8	MgO	1.1
SiO ₂	52.3	Fe ₂ O ₃	4.2
AL ₂ O ₃	33.7	SO ₃	0.5
CaO	2.8		

Internal Curing Agent, CICA) 由自行研发, 主要由高聚物凝胶体与轻骨料复合加工而成。内养护材料的技术指标见表3。

表3 内养护材料的基本性能指标

类型	吸水率/%	粒径	级别	有效释水率/%
CICA	276.0	60~80 mm	—	83.2
SAP	271.0	80~120 目	—	67.3
轻骨料	36.6	20 mm	500	56.1

1.2 试验方法

(1) 依据内养护材料的性质、状态, 通过不同方式掺入水泥砼。其中: CICA、轻骨料的加入方式为代替一定比例细集料; SAP 先直接和骨料预拌和, 使其分散均匀, 然后加入水泥、外加剂及水搅拌。

(2) 通过内养护材料的有效引水量指标进行不同掺量下砼性能分析, 内养护用水量分别为砼基准用水量的 0%、10%、20%、30%, 材料掺量依据有效释水率换算。

(3) 按照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》, 采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块对水泥砼进行抗压强度和回弹模量试验, 分析其力学性能。抗渗性能采用电通量指标, 按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行试验。早期塑性开裂采用收缩变形与开裂面积指标, 按照 GB/T 50082—2009 中的方法测试, 其中收缩变形试验采用 100 mm×100 mm×515 mm 试件, 将试件用塑料薄膜和石蜡密封置于标准养护室; 开裂面积指标利用标准试验条件下观察所得浇筑后 48 h 内的裂缝数量、长度和宽度进行计算。

2 CICA 对砼力学性能的影响

2.1 抗压强度影响分析

图1为3种内养护材料不同掺量、不同养护龄期下砼的抗压强度。

由图1可知: 1) 不同养护龄期(3、7、28d)下,

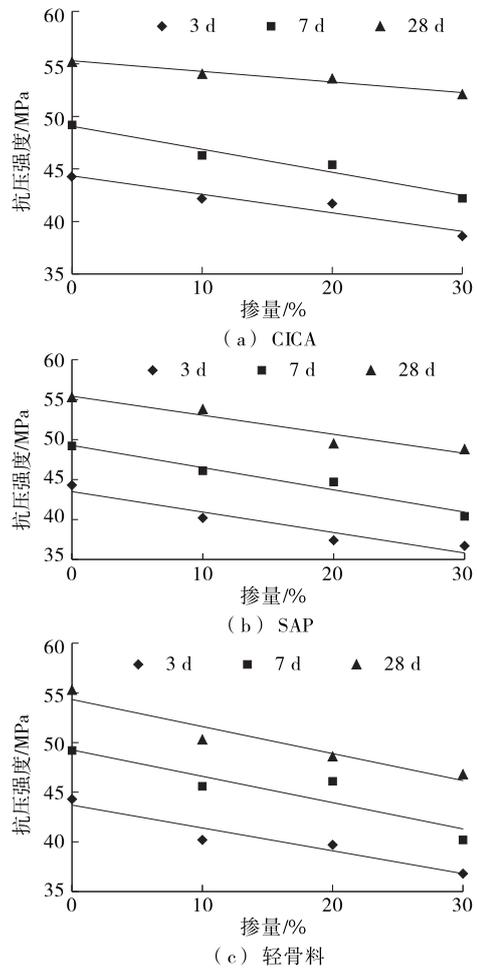


图1 砼抗压强度随内养护材料掺量的变化

砼抗压强度随内养护材料掺量的增加呈下降趋势, 且随养护龄期的延长材料掺量对抗压强度的影响降低, 即内养护材料对砼早期强度的影响较显著。如 CICA 掺量为 10%、30% 时, 砼 3 d 抗压强度分别为 42.4 和 38.6 MPa, 掺量 20% 时砼 3、28 d 强度分别降低 5.87% 和 3.07%。2) 养护材料类型对砼抗压强度也存在显著影响。其中自主研发的 CICA 对其影响较小, 尤其是后期强度, 而 SAP、轻骨料对砼强度的劣化显著, 说明内养护材料性能是影响砼力学性能的关键因素。如养护龄期 28 d 时, 掺量 30% 的 CICA、SAP、轻骨料砼的抗压强度分别为 52.1、48.8、46.8 MPa, 分别下降 5.79%、11.75%、15.37%; 掺量 10% 的抗压强度分别下降 2.17%、2.71%、9.04%。说明 CICA 养护材料掺量变化对后期强度影响的敏感性显著降低。对于公路砼内养护技术, 研发性能优良的内养护材料尤为重要。

抗压强度与内养护材料掺量的拟合线性关系见表4。由表4可知: 随着材料掺量的增加, 不同龄期

(3、7、28 d)下 CICA 砼强度的斜率均比 SAP、轻骨料的小,且 3 种材料 28 d 的斜率均比 3 d 的大,说明

内养护技术对砼早期强度影响显著,CICA 内养护技术对砼强度的劣化微弱。

表 4 抗压强度与内养护用水量拟合关系

养护时间/d	拟合方程式		
	CICA	SAP	轻骨料
28	$y = -0.101x + 55.29, R^2 = 0.9683$	$y = -0.238x + 55.42, R^2 = 0.9277$	$y = -0.272x + 54.33, R^2 = 0.9218$
7	$y = -0.219x + 49.06, R^2 = 0.9620$	$y = -0.278x + 49.27, R^2 = 0.9646$	$y = -0.265x + 49.25, R^2 = 0.8371$
3	$y = -0.176x + 44.34, R^2 = 0.9319$	$y = -0.256x + 43.49, R^2 = 0.9181$	$y = -0.230x + 43.70, R^2 = 0.9245$

综上,内养护材料或多或少会降低砼结构的强度,依据文献[7]、[8]、[10],砼内部结构中 SAP 释放大水分促进水泥水化的同时本身将遗留下一部分有害微细孔或多害孔,将对砼强度产生不利影响;对于多孔陶粒,其本身强度低于碎石骨料,随着替代集料量的增加,也会增加砼内部结构的薄弱点进而引起强度降低,这与上述抗压强度试验结果一致。自主研发的 CICA 养护材料采用超细磨加工工艺,在原材料粒径上提出了更高要求,提高了 CICA 在砼结构中的均匀分布效果,能在结构内部湿度平衡不足时均匀释放水分,与其他内养护材料相比,有利于提高胶凝材料的水化程度,避免因材料释水而增加微孔细结构和轻骨料替代集料而劣化砼强度导致强度不足的问题。

2.2 弹性模量影响分析

水泥砼的弹性模量受集料强度、集料含量及水泥水化程度的影响较显著。实体工程中,由于集料强度偏低(压碎值大)、水泥水化不彻底等导致弹性模量下降,甚至不满足规范要求的现象频频出现。图 2 为 3 种内养护材料不同掺量砼在养护 28 d 时的弹性模量。

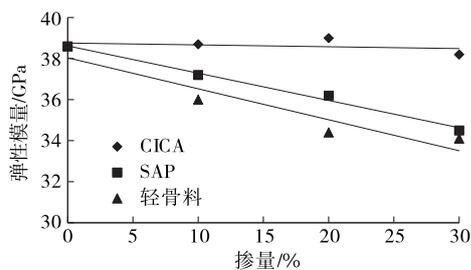


图 2 砼弹性模量随内养护材料掺量的变化

由图 2 可知:1) 内养护材料降低了砼弹性模量,且随掺量的增加而逐渐加重。与抗压强度分析结果相比,内养护技术对弹性模量的影响程度弱化。

说明掺加内养护材料显著促进了水泥水化效果,弥补了因养护材料性质导致的缺陷,有利于弹性模量的增加。如 SAP 掺量 10%、20%和 30%下的回弹模量分别降低 3.63%、6.22%和 10.6%,与抗压强度(2.71%、10.49%和 11.75%)相比影响程度减弱,对轻骨料砼弹性模量的改善效果更鲜明。2) CICA 对砼弹性模量的劣化较弱,合理用量时能进一步提高回弹模量,优于 SAP 和轻骨料。与 SAP、轻骨料相比,CICA 材料结合了高分子吸水树脂、多孔陶粒的优点,伴随砼养护过程能持续、均匀地为水泥水化补偿水分,有力活跃了水泥矿料,即弥补了 SAP 材料在砼结构中易团聚、分散不均匀而影响其力学性能的问题,又避免了因轻骨料压碎值不足而导致的砼整体力学强度下降的现象。性能优良的内养护材料能通过调整水泥浆体毛细孔饱水状态,最大限度地降低砼内部结构自收缩应力。

以掺加水泥砼基准用水量 20%为例,CICA、SAP 和轻骨料砼的弹性模量分别为 39.36.2 和 34.4 GPa,分别降低 -1.04%、6.22%和 10.88%。3 种内养护砼弹性模量与内养护材料掺量的关系见表 5。

表 5 砼弹性模量与内养护用水量拟合关系

内养护材料	拟合方程式
CICA	$y = -0.049x + 38.36, R^2 = 0.7859$
SAP	$y = -0.133x + 38.62, R^2 = 0.9907$
轻骨料	$y = -0.151x + 38.04, R^2 = 0.8957$

3 CICA 对抗渗性能的影响

砼抗渗能力是否优良严重影响结构物的使用寿命。依据 GB/T 50082-2009 采用电通量法对标准养护 28 d 的试件进行测试,试验结果见图 3。电通量系数越大,说明氯离子在砼内部扩散越容易,抗渗透能力越差。

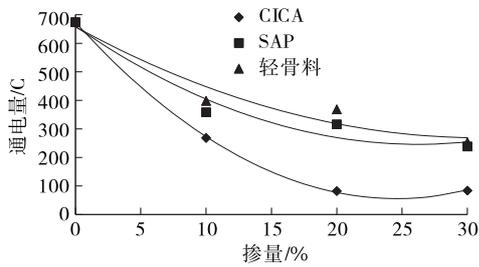


图3 砼电通量随内养护材料掺量的变化

从图3可以看出:1) 掺加内养护材料可显著改善砼的抗渗性能,与未参加内养护材料砼相比,内养护砼电通量参数均显著降低,且随内养护材料用量的增加,电通量参数呈凹形曲线变化,说明内养护技术提高了水泥水化程度,改善了砼密实结构,并使内部孔隙结构趋于细化,进一步消除了由于水化不均匀而产生的早期裂纹。如CICA内养护材料掺量为10%、20%、30%时,砼电通量分别降低60.21%、87.82%、87.55%。2) 内养护材料对砼抗渗性能的改善效果与其性质存在密切联系,CICA复合型内养护材料的改善效果优于SAP和轻骨料。根据文献[9],在一定掺量下,内养护材料的粒径越细、水胶比越低对砼内部结构有害孔(9~50 nm)的降低越显著,与上述试验结果相吻合。主要是因为CICA结合了SAP和轻骨料两种材料的特性,通过复合加工工艺进一步降低了细度,能在水泥水化水分迁移过程中始终保持均匀补偿,减小毛细孔溶液负压,较好地延缓砼内部相对湿度的降低速率,进而降低砼因水化有害孔而产生的应力。另外,内养护材料对砼电通量的改善效果存在合理掺量范围,对CICA而言,掺量为20%~25%时其改善效果最佳,电通量值较低。

4 CICA对早期抗裂性能的影响

4.1 收缩变形影响分析

砼结构物由于收缩产生裂缝,轻则影响结构物的外观质量及装饰效果,重则引起内部结构早期破坏影响其耐久性。按照GB/T 50082-2009要求成型100 mm×100 mm×515 mm试件,在恒温(20±2)%、恒湿(60±5)%干缩试验箱中进行标准养护,试验结果见图4。

由图4可知:1) 内养护技术降低了砼收缩变形,随养护时间的延长收缩变形逐渐增加,且趋于稳定。如掺量20%的CICA内养护砼养护3、7、28 d的总变形分别为 79×10^{-4} 、 91×10^{-4} 、 90×10^{-4} ,28 d

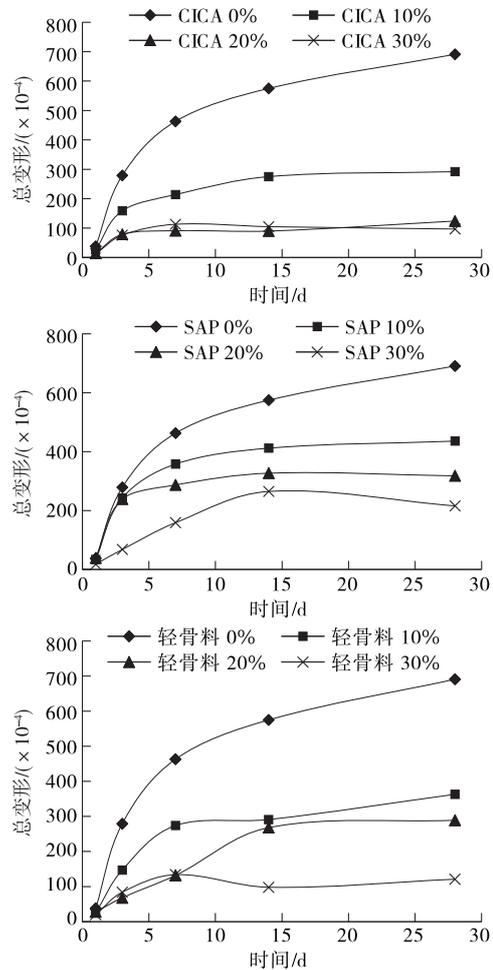


图4 砼总变形随养护时间的变化

的收缩总变形降低82.1%。2) 内养护材料对砼早期收缩变形影响较显著,改善效果较好。采用内养护措施后,内养护材料及时补偿水分,能有效改善水泥水化程度,提高砼的抗裂性能。3) 内养护材料性能、掺量均对砼的收缩变形产生一定影响。CICA内养护砼的抗收缩变形能力优于轻骨料和SAP;CICA掺量20%、30%时的收缩变形远低于掺量10%时,且二者变形相差较小;而轻骨料和SAP内养护砼的收缩变形对掺量的敏感性显著。

综上,CICA能显著减小砼的塑性收缩,对砼的补偿可一直持续到后期水泥水化,可为砼的水化提供良好的内部动态养护环境,其合理掺量(20%~30%)既能为后期抗压强度发展提供保障,又能解决砼的早期收缩问题。

4.2 塑性开裂面积影响分析

内养护技术通过材料有效释水缓解水泥水化产生的应力收缩问题。图5为平板约束早期塑性开裂试验结果。

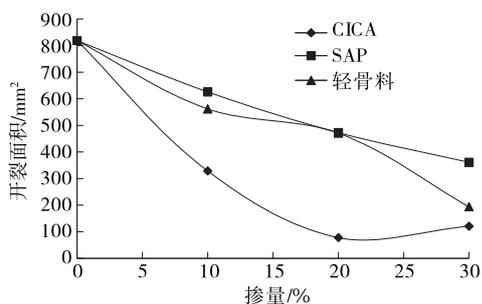


图 5 砼开裂面积随内养护材料掺量的变化

由图 5 可知:1) 随着内养护材料掺量的增加,内养护砼的开裂面积显著下降,裂缝发展得到有效控制,这与上文分析结果一致。其中 CICA 砼的开裂面积远小于 SAP 和轻骨料砼,说明 CICA 内养护材料对砼塑性开裂的改善效果较好,与 SAP、轻骨料相比,对砼抗裂性能的改善具有显著优势。如掺量 20% 时,CICA、SAP、轻骨料砼的开裂面积分别降低 90.5%、42.2%、42.5%。2) CICA 对水泥砼性能的改善存在一定掺量范围。结合内养护材料特性,精确地引入内养护用水量(有效释水率)才能兼顾砼各项性能,内部水分过多或不足均不能促进砼达到理想状态,尤其是对于早期抗裂性能。如掺量 20%、30% 时,CICA 砼的开裂面积分别为 78、121 mm²,掺量 30% 时开裂面积增加。

5 结论

(1) 内养护技术对水泥砼力学性能具有劣化作用,且劣化程度与内养护材料掺量、类型存在密切联系。砼抗压强度和弹性模量随内养护材料掺量的增加呈降低趋势,自主研发的复合型内养护剂 CICA 对砼力学性能的劣化作用远小于 SAP 和轻骨料。

(2) 内养护技术能显著提高砼的抗渗性能,提高其耐久性。砼电通量随内养护材料掺量的增加而显著降低,CICA 对其抗渗性能的改善效果优于 SAP 和轻骨料,且 CICA 掺量为 20%~25% 时对砼的改善效果最佳,电通量较低。

(3) 掺加内养护材料可减少砼的早期变形,提高其抗塑性收缩、自身收缩变形能力,且随材料掺量

的提高,砼的抗裂性能改善效果越明显。CICA 掺量为 20%~25% 时砼的收缩总变形、开裂面积最小,改善程度最佳。

参考文献:

[1] 姚刚,高天,张利.清水混凝土施工的质量缺陷与预控措施[J].重庆建筑大学学报,2004,26(2).

[2] 朱长华,李享涛,王保江,等.内养护对混凝土抗裂性及水化的影响[J].建筑材料学报,2013,16(2).

[3] 陈瑜,邓怡帆,唐琪,等.预湿轻骨料内养护功能及其对混凝土的影响[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2015,12(3).

[4] 陈伟,黄展魏,申培亮.密封养护剂对露石混凝土路用性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(6).

[5] 胡曙光,王发洲,丁庆军,等.轻集料的吸水率与预处理时间对混凝土工作性的影响[J].土木工程与管理学报,2002,19(2).

[6] 马先伟,张家科,刘剑辉.高性能水泥基材料内养护剂用高吸水树脂的研究进展[J].硅酸盐学报,2015,43(8).

[7] Klemm A J, Baker P, Sikora K. The effect of super absorbent polymers on the performance of immature cementitious mortars [J]. Brittle Matrix Composites, 2012(10).

[8] Mousa M I, Mahdy M G, Abdel-Reheem A H, et al. Physical properties of self-curing concrete (SCUC)[J]. HBRC Journal, 2015, 11(2).

[9] 叶华,赵建青,张宇.吸水树脂水泥基材料自养护外加剂的研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(11).

[10] 陈德鹏,钱春香,高桂波,等.高吸水树脂对混凝土收缩开裂的改善作用及其机理[J].功能材料,2007,38(3).

[11] 詹炳根,丁以兵.掺聚丙烯酸酯类 SAP 低水灰比水泥浆水化研究[J].建筑材料学报,2012,10(2).

[12] 孔祥明,张珍林.高吸水性树脂对高强混凝土浆体孔结构的影响[J].硅酸盐学报,2013,41(11).

收稿日期:2017-02-21

(上接第 96 页)

程[S].

[2] JTG/T F40-02-2005,微表处和稀浆封层技术指南[S].

[3] 詹成根.改性剂及乳化剂对改性乳化沥青性能的影响[J].公路与汽运,2011(5).

收稿日期:2017-08-11