

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.05.048

矿物掺合料对蒸养水泥砂浆强度和干缩性能的影响

潘俊明¹, 孙晋超², 阮波^{3*}

(1. 江苏省铁路集团融发管理有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 苏北铁路有限公司; 3. 中南大学 土木工程学院)

摘要:以铁路预制轨道板等重要工程中典型蒸养工艺为基础,研究了蒸养条件下掺入不同掺量的粉煤灰、矿渣和石灰石粉等矿物掺合料对水泥浆体抗压强度、干缩性能和孔结构的影响。结果表明:蒸养条件可提高矿渣和粉煤灰早期水化速率,但后期纯水泥试样的抗压强度高于掺有矿物掺合料的蒸养浆体;除掺量为10%的石灰石粉外,掺入上述矿物掺合料可减缓蒸养浆体干缩效应,各龄期的干缩随着掺量的增加而减少,其中矿渣效果最明显。孔径小于50 nm的孔对蒸养浆体的干缩效应影响较大,掺入矿物掺合料和蒸养条件可增加小于50 nm的孔所占的含量。

关键词:矿物掺合料; 蒸养水泥浆体; 抗压强度; 干燥收缩; 孔结构

1 前言

为建设绿色环保型社会,减少工业废渣堆积对环境造成的不利影响,常将工业废渣作为矿物掺合料掺入混凝土,可改善混凝土性能。而高性能混凝土以加入矿物掺合料作为前提,因此其力学性能和体积稳定性成为必须考虑的重点之一。

蒸气养护条件下制成的高性能混凝土具有施工效率高、成本低、表面光洁度高、生产节能等优点,因此在许多重大工程如高速公路、公铁桥梁和无砟轨道中有广泛的应用。实践应用中发现:使用蒸气养护的混凝土构造物仍出现了多种问题,比较突出的是混凝土开裂。混凝土产生裂缝的主要原因之一是干燥收缩,因为在高湿环境下,混凝土体系中的水分散失将引起水泥浆体体积缩小。关于收缩性能,许多学者做了深入研究。宋亮分析粉煤灰对再生混合料干缩应变具有抑制效果,确定最佳掺量为1.05%;曹长伟等通过对比试验研究发现乳化沥青—水泥稳定钙石混合料具有刚度小、干缩性能小、工期短、工程造价低等优点;李九苏等研究粉煤灰、膨胀剂双掺技术对混凝土性能的影响,发现粉煤灰、膨胀剂的掺入减小了干缩应变、降低了抗弯弹性模量。对于标准养护条件下,矿物掺合料对水

泥浆体干缩的影响,已有诸多报道且结论不尽相同。但在蒸养条件下的研究更是少之又少。该文系统地研究蒸养条件下,粉煤灰、矿渣和石灰石粉3种常见矿物掺合料对水泥浆体强度和干缩性能的影响,为矿物掺合料在高性能蒸养混凝土中的应用提供理论支持。

2 试验

原材料中包括基准水泥(PC)、磨细粉煤灰(A)、S95级粒化高炉矿渣粉(B)和石灰石粉(C)。减水剂采用减水率为30%的聚羧酸减水剂。试验材料的化学组成及物理性能如表1所示。

表1 水泥和矿物掺合料的化学组成 %

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	f—CaO
PC	20.76	7.31	3.25	61.26	2.01	2.71	0.70
A	52.70	25.80	9.70	3.70	1.20	0.20	
B	34.55	14.36	0.45	33.94	11.16	1.95	
C	2.58	1.49	0.65	50.36	2.25		

试验采用的蒸养方法是根据中国铁路预制梁体和轨道板设计的,蒸养温度为(60±5)℃,养护结束后静置24 h脱模。各试样配合比设计如表2所示,水胶比为0.27,通过调整减水剂用量使浆体流动度控制为(160±20) mm,以便于成型。

收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51668021)

作者简介:潘俊明,男,大学本科,高级工程师。E-mail:251325816@qq.com

* 通信作者:阮波,男,博士,副教授。E-mail:421084359@126.com

表 2 各试样配合比(质量分数) %

编号	PC	A	B	C
PC	100			
A ₁	90	10		
A ₄	60	40		
B ₁	90		10	
B ₄	60		40	
C ₁	90			10
C ₄	60			40

按表 2 称取相应材料,分别成型 25 mm×25 mm×250 mm 和 20 mm×20 mm×20 mm 两种尺寸试件。将脱模后的试样移入温度为(20±3)℃、湿度为 90%的恒温恒湿控制箱中进行养护,其中 20 mm×20 mm×20 mm 试件养护到指定龄期后进行抗压强度测试,并在 3、90 d 龄期的破碎样品中选取约 3 mm 的颗粒浸泡于丙酮中,采用压汞仪进行孔结构测试。25 mm×25 mm×250 mm 试件自成型时算起养护至 3 d 时取出,待试件表面擦干后测量初始长度(c_0),测量仪器为比长仪。测量结束后,把试件放回养护箱养护至指定龄期,养护箱温度设置为(20±1)℃,湿度为(40±3)%。分别测量龄期 t 时试件的长度(c_t)。按式(1)计算水泥浆体干缩率(C_t):

$$C_t = (c_0 - c_t) / 250 \times 100\% \tag{1}$$

3 结果与讨论

3.1 抗压强度

图 1 为蒸养水泥浆体在不同龄期(3、90 d)下强度随掺合料掺量的变化情况。由图 1 可知:在 3 d 龄期时,掺有矿渣和粉煤灰的蒸养水泥浆体抗压强度随掺量的增加呈现先升后降的趋势,而掺石灰石粉的试样随掺量的增加而降低。说明蒸养条件对粉煤灰和矿渣早期活性具有一定的激发作用,从而提高浆体中水化产物含量。与矿渣相比,粉煤灰的活性仍较低,因此抗压强度随着掺量的增加而显著降低。蒸养条件对石灰石粉的水化活性基本没有影响,石灰石粉仅作为惰性填充材料,因此掺入石灰石粉后试样抗压强度低于纯水泥试样。随着龄期的延长,在矿物掺合料等量取代水泥 20%范围内,90 d 龄期时掺有矿渣和粉煤灰的蒸养试样抗压强度基本相同,但超过 20%范围后,掺粉煤灰的试样抗压强度有明显的降低。而掺石灰石粉的蒸养试样随着掺量的增加抗压强度呈线性降低。这说明蒸养条件下,粉煤灰的火山灰活性主要在 3 d 后

才有效发挥。由于粉煤灰中具有聚合度很高的 SiO_4^{4-} ,且晶体结构致密,从而导致 SiO_4^{4-} 的溶解速率非常缓慢,因此在早期粉煤灰的水化活性较难发挥。随着龄期的不断延长,水泥水化过程中所产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量增多,从而提高了对粉煤灰的火山灰活性的激发效应。此外,当水泥浆体中掺入粉煤灰的含量越多,体系内火山灰反应越强,可明显提高蒸养浆体后期的抗压强度。与矿物掺合料掺量为 10%的蒸养水泥浆体相比,当掺量为 40%时,掺矿渣的试样抗压强度降低 14%,掺粉煤灰的试样降低 25%,而掺石灰石粉的试样降低了 48%。这说明蒸养条件下,当矿渣的掺量少于 40%时,掺量对强度的影响较小。而石灰石粉掺量较大时,对抗压强度产生不利影响,因此蒸养水泥浆体中不宜大掺量掺入石灰石粉。

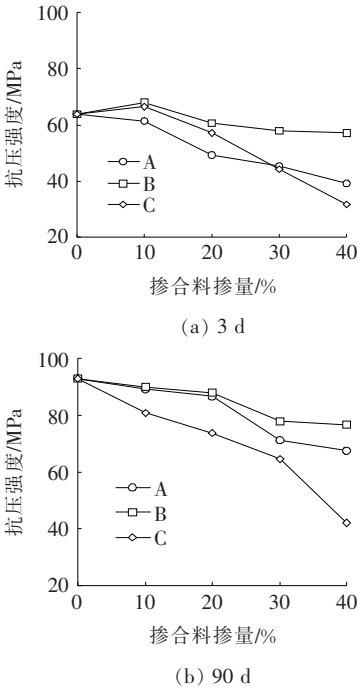


图 1 掺合料掺量对蒸养浆体抗压强度的影响

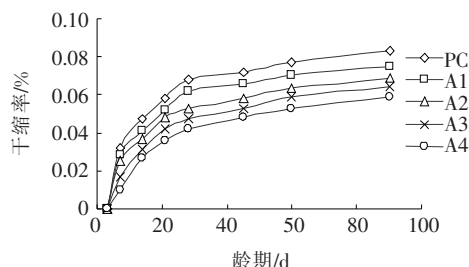
3.2 干燥收缩

图 2 为掺有不同矿物掺合料的水泥浆体干燥特性曲线。

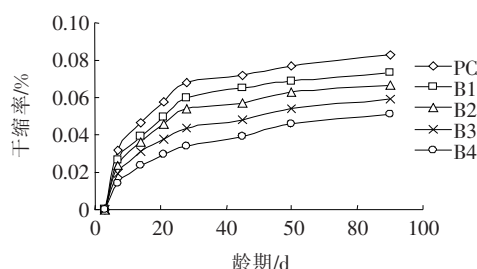
由图 2 可知:

(1) 随着龄期的延长,所有试样的干缩率出现逐渐增大的现象,但在 28 d 后曲线发展趋于平缓。这主要是由于水化反应贯穿整个养护龄期,但 28 d 龄期前水化速率较快,之后逐渐减缓。另外,掺入粉煤灰和矿渣都有利于降低蒸养水泥浆体干缩值,且干缩值随这两种矿物掺合料掺量的增加而进一步降低。而掺入石灰石

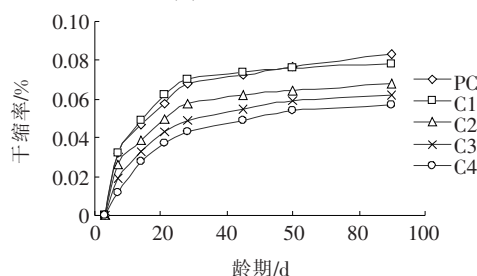
粉的蒸养水泥浆体,其收缩率随石灰石粉掺量的增加出现先增大后降低的现象,在掺量为10%时收缩率值最大。此外,当石灰石粉的掺量超过10%后,掺有石灰石粉的蒸养水泥浆体收缩率都低于纯水泥蒸养浆体。



(a) 掺粉煤灰试样



(b) 掺矿渣试样



(c) 掺石灰石粉试样

图2 蒸养水泥浆体干燥特性曲线

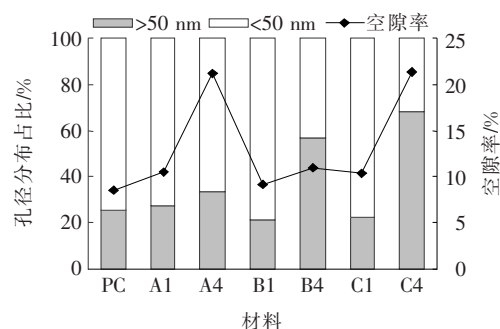
(2) 在28 d龄期时,与纯水泥PC相比,当矿物掺合料的掺量为10%时,掺粉煤灰的蒸养水泥浆体干缩率降低了8%,掺矿渣时降低了12%,掺石灰石粉时增加了3%;当矿物掺合料的掺量为40%时,掺粉煤灰的蒸养水泥浆体干缩率降低了38%,掺矿渣时降低了50%,掺石灰石粉时降低了37%。由此可知,当矿物掺合料的掺量相同时,矿渣对减缓蒸养水泥浆体干缩现象的效果最明显。另外,增大石灰石粉的掺量将明显提高水泥浆体抗收缩能力。

矿物掺合料的掺入对水泥浆体干燥收缩的影响具有正负效应:一方面,矿物掺合料等量取代水泥后,蒸养浆体中水泥含量减少,因此早期水泥水化产生的水化产物含量减少,自由水含量增多,浆体孔结构发生变化,将加大干燥收缩现象;另一方面,矿物掺合料具有

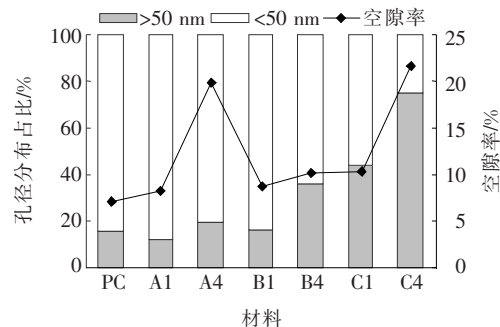
微填充作用,可稳定和抑制浆体变形,起到骨架支撑作用,使得矿物掺合料的掺入能较好地降低干缩现象。除此之外,矿物掺合料若具有良好的火山灰活性,可促进浆体水化速率,增加浆体中C—S—H等水化产物凝胶的含量,从而加强了结构的抗变形能力,使得干缩大大下降。由于粉煤灰和矿渣属于火山灰材料,且蒸养条件下进一步促进了其活性的激发,因此有利于改善水泥浆体干缩现象。而石灰石粉的活性较低,可作为惰性材料,掺入石灰石粉后浆体中水化产物减少,抗收缩能力降低。但石灰石粉颗粒较细,具有良好的填充作用,因此当掺量超过10%后,可有效提高水泥浆体抗收缩能力。

3.3 孔结构

图3为3、90 d龄期时,通过压汞试验测得的不同试样孔隙结构。已有研究认为,水泥浆体里孔可分为大于50 nm的宏观孔和小于50 nm的孔两大部分。大于50 nm的宏观孔对强度影响更大,宏观孔中的水称为自由水,自由水在浆体内部的转移不会引起任何体积变化。而小于50 nm的孔包括较小的毛细孔和层间孔,这两种孔发生失水时会引起系统收缩。因此,该文分析不同试样孔结构中大于50 nm和小于50 nm的孔占总空隙率的百分比情况,结果如图3所示。图中折线部分为试样孔隙率变化情况。



(a) 3 d



(b) 90 d

图3 蒸养试样孔结构变化

由图 3 可知:

(1) 随着龄期从 3 d 延长至 90 d, 所有试样的空隙率都有所减少。与纯水泥浆体相比, 掺入矿物掺合料后将增大蒸养水泥浆体空隙率。随着矿物掺合料掺量的增加, 蒸养水泥浆体的空隙率都有所增大, 其中矿渣掺量对空隙率的影响最小, 而掺粉煤灰和石灰石粉的蒸养水泥浆体的空隙率几乎成倍增加。由此可知, 蒸养水泥浆体抗压强度与空隙率具有直接关系。空隙率越高, 浆体抗压强度越低。在研究的 3 种矿物掺合料中, 矿渣的火山灰活性最强, 已有研究表明, 当矿渣掺量少于 50% 时, 其水化活性随掺量的变化较小。因此, B1 和 B4 试样中能产生足够多的水化产物填充孔隙, 为水泥浆体提高足够的强度, 同时也提高了浆体的抗变形能力, 减缓干燥收缩现象。

(2) 纯水泥试样和掺矿物掺合料试样中大于 50 nm 的宏观孔所占的比例随龄期延长而降低, 小于 50 nm 孔所占的比例随龄期延长而增多。这主要由于随着龄期的延长, 各试样水化还在持续进行, 仍继续生成水化产物, 因此蒸养试样的干缩率随着龄期的延长而增大。值得注意的是, 随着矿物掺合料掺量的增加, 试样中大于 50 nm 的大孔所占比例增大, 而小于 50 nm 的孔所占比例有所减少。这是由于掺入矿物掺合料导致水泥水化产物含量减少, 水泥浆体中自由水含量增多, 孔隙结构出现不同程度的粗化, 即大孔的含量增加。除此之外, 蒸养条件下特别是升温阶段存在水和气的膨胀, 将导致体系体积膨胀, 且这种体积膨胀无法完全复原, 导致蒸养水泥浆体中大孔含量增加, 在宏观上即表现为肿胀变形。由于稀释效应, 掺入矿物掺合料的水泥浆体使得体系中有效水灰比增大。另外, 掺入矿渣虽加快了蒸养水泥浆体中的早期水化速率, 但同时也导致水化产物层变得致密从而阻碍扩散阶段的水化, 减少后期水化产物。这些现象都将导致水泥浆体的热损伤, 且矿物掺合料掺量越大, 热损伤越严重, 即表现为小于 50 nm 的孔所占比例减少。当蒸养浆体中小于 50 nm 的孔含量减少, 浆体中干缩现象可得到明显的减缓, 特别是掺矿渣的水泥浆体。

4 结论

(1) 相对于不掺矿物掺合料的蒸养试样, 掺量为 10% 的矿渣和粉煤灰蒸养试样抗压强度较高。但后期掺有矿物掺合料的所有试样抗压强度均较小, 且随掺

量的增加抗压强度逐渐降低, 其中矿渣随掺量的影响最小, 而掺石灰石粉的蒸养试样随掺量的增加抗压强度线性降低。

(2) 除 10% 的石灰石粉以外, 掺入矿物掺合料有利于减缓蒸养浆体干缩效应, 且掺量越大, 干缩率越低。相同掺量下, 掺入矿渣的蒸养浆体干缩率最低, 其次是粉煤灰和石灰石粉。

(3) 掺入矿物掺合料将增大蒸养浆体中的热损伤效应, 并提高蒸养浆体空隙率, 改变孔隙结构。除矿渣以外, 加大矿物掺合料掺量后蒸养浆体空隙率显著增大。孔径小于 50 nm 的孔对蒸养浆体的干缩效应影响超过大于 50 nm 的孔, 其中增加矿渣的掺量将明显减少小于 50 nm 的孔占总空隙率的含量。

参考文献:

- [1] 陈德华, 王一文. 高掺量粉煤灰混凝土路用性能的探讨[J]. 中南公路工程, 2001(2).
- [2] 谢友均, 马昆林, 刘运华, 等. 蒸养超细粉煤灰高性能混凝土性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2007(3).
- [3] Liu B, Xie Y, Li J. Influence of Steam Curing on the Compressive Strength of Concrete Containing Supplementary Cementing Materials[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5): 994—998.
- [4] Sajedi F, Razak H A. Effects of Curing Regimes and Cement Fineness on the Compressive Strength of Ordinary Portland Cement Mortars[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 2 036—2 045.
- [5] 元强, 郭建光, 邓德华, 等. 板式轨道用高弹模水泥沥青砂浆与混凝土黏结性能的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013(6).
- [6] 蔡跃波. 掺活性掺合料混凝土研究与应用中的几个疑难问题[J]. 硅酸盐学报, 2000(Z1).
- [7] 宋亮. 粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响[J]. 中外公路, 2017(4).
- [8] 曹长伟, 景慎, 钱劲松, 等. 乳化沥青—水泥稳定钙石基层路用性能试验研究[J]. 中外公路, 2014(3).
- [9] 李九苏, 刘朝晖, 姚佳良. 粉煤灰、膨胀剂双掺技术提高连续配筋混凝土性能的试验研究[J]. 中外公路, 2006(3).
- [10] 焦宝祥, 钟白茜. 激发剂对粉煤灰—Ca(OH)₂ 系统性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(1).
- [11] 贺智敏. 蒸养混凝土的热损伤效应及其改善措施研究[D]. 中南大学博士学位论文, 2012.
- [12] Termkhajornkit P, Barbarulo R. Modeling the Coupled Effects of Temperature and Fineness of Portland Cement on the Hydration Kinetics in Cement Paste[J]. Cem Concr Res, 2012, 42(3): 526—538.