

石灰石粉做矿物掺合料对水泥路面性能的影响研究

高桂海

(西昌学院 土木与水利工程学院, 四川 西昌 615000)

摘要:该文将石灰石粉等质量替代水泥用于水泥混凝土路面中,研究0%、5%、10%、15%、20%、25%和30%的石灰石粉掺量对混凝土的工作性能、强度特性、抗冻耐久性、干缩特性以及耐磨性的影响。试验结果表明:石灰石粉的掺量变化对混凝土的工作性能影响明显,加入石灰石粉后混凝土的坍落度增加,工作性能得到改善。混凝土的抗压强度、抗冻性及耐磨性在石灰石粉掺量较少时得到提高,混凝土的抗折强度则随着石灰石粉掺量的增加而降低。权衡以上各项性能,建议石灰石粉掺量不超过20%。

关键词:石灰石粉;水泥混凝土路面;力学性能;耐久性

水泥混凝土路面具有强度高、稳定性及耐久性好等突出优点,是中国应用最为广泛的路面结构之一。随着绿色环保和可持续发展理念的提出及实践,水泥混凝土路面的设计、施工及运营养护也应适应时代发展的需求。筑路材料的研发不仅要保证混凝土的工作性能、耐久性能和施工性能,还应兼顾造价经济及绿色环保等需求。现阶段常采用粉煤灰、硅灰和矿渣等矿物掺合料来改善水泥混凝土的施工性能、提高水泥混凝土的耐久性。在一些发达国家,除了传统的矿物掺合料以外,石灰石粉也逐渐被用作水泥混凝土的矿物掺合料。石灰石粉是生产石灰石过程中产生的副产品,这种工业废料的不当处理会造成资源浪费和环境污染的双重问题。德国率先研发了6%~20%掺量的石灰石粉硅酸盐水泥;欧洲水泥标准 ENV 197 将石灰石粉硅酸盐水泥中石灰石粉替换比例分为6%~10%和21%~35%两种;法国标准 CPJ45R 及 CPJ45R 建议石灰石粉掺量为10%~25%;日本则在高流动性混凝土和高性能喷射混凝土中广泛使用石粉替代传统矿物掺合料,工程应用效果良好;严超君研究发现石灰石粉掺量对混凝土的早强强度及后期强度均有影响,并且调整石灰石粉在混凝土中掺量可以改善混凝土的工作性能及抗渗性能;陈剑雄等研究表明掺入石灰石粉的混凝土拌和物坍落度提高是由于石灰石粉具有良好的形态效应和填充效应;Menéndez 等研究证明,石灰石粉用作混凝土的矿物掺合料时,需严格控制石灰石粉细度。石灰石粉颗粒只有足够小才可以进入到水泥

水化产物的空隙中起到微集料填充作用;Takami 研究表明随着石灰石粉掺量的提高,混凝土抗压强度逐渐降低。但当石灰石粉以添加剂的方式加入混凝土时,混凝土的抗压强度得到提高;洪锦祥指出,随着石灰石粉掺量的提高,混凝土的抗冻性越好;黄汉洋等认为石灰石粉孔隙填充作用是其能够降低混凝土的干燥收缩的关键,因此掺加石灰石粉有利于混凝土的抗冻性;Justnes 指出在硫酸盐侵蚀的条件下石灰石硅酸盐水泥混凝土会产生质量损失、膨胀和强度退化,因此,应限制石灰石硅酸盐水泥在硫酸盐环境下的使用。

当前,石灰石粉的研究以建筑结构混凝土为主要研究方向,石灰石粉在水泥混凝土路面方面的应用研究并不广泛。此外,中国的石灰石矿产丰富且分布广泛,石灰石粉产量大、价格低。因此,如果把石灰石粉加入水泥混凝土路面中,不仅能够改善水泥混凝土路面的性能,而且可以降低造价,达到绿色环保的目的。该文通过试验研究石灰石粉的掺加对水泥混凝土的工作性能、力学性能、耐久性、缩裂性能以及路面耐磨性的影响,可为石灰石粉在水泥混凝土路面中的应用提供指导。

1 原材料及配合比设计

1.1 原材料

(1) 水泥

试验所采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,其各项性能

指标均符合有关规范要求。

(2) 石灰石粉

试验采用的石灰石粉产自山东济南,其性能指标如表 1 所示。

表 1 石灰石粉性能指标

细度/ %	45 μm 筛余量/%	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	表观密度/ (g·cm ⁻³)	烧失量/ %
12	16.30	9.6	2.53	4.67

表 2 试验配合比设计

配合比 编号	石粉掺 量/%	水泥/ (kg·m ⁻³)	碎石/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	水胶比	减水剂/ (kg·m ⁻³)
T1	0	460	1 160	572	0.4	4.0
T2	5	437	1 160	572	0.4	4.0
T3	10	414	1 160	572	0.4	4.0
T4	15	391	1 160	572	0.4	4.0
T5	20	368	1 160	572	0.4	4.0
T6	25	345	1 160	572	0.4	4.0
T7	30	322	1 160	572	0.4	4.0

该文采用的混凝土搅拌工艺为矿物掺合料裹砂法。常规搅拌工艺易引起水泥结团,混凝土拌和物不均匀及存在大量气泡影响密实性等问题。矿物掺合料裹砂法可有效避免以上问题,其具体拌制流程为:首先在搅拌机中加入砂和 70% 的水搅拌 20 s,然后加入水泥和石灰石粉继续搅拌 30 s,此时砂的表面已经均匀裹覆上浆体,最后加入碎石、剩余的水及减水剂搅拌 60 s。混凝土拌和均匀后成型各种混凝土试件,每组混凝土试件均包含 3 个平行试件。混凝土试件成型后放入温度为(20±2)℃、相对湿度 95% 以上的养护箱内进行养护。

2 石灰石粉掺量对混凝土工作性能的影响分析

良好的混凝土工作性能不仅可以提高水泥混凝土浇筑质量,同时可以起到加快施工进度、减小施工噪音以及改善劳动条件的作用。该文中水泥混凝土的工作性能采用坍落度来定量表征,分别测量 0%、5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 石灰石粉掺量下水泥混凝土的坍落度,结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出:水泥混凝土拌和物的坍落度随着石灰石粉掺量的增加而增加。未添加石灰石粉的水

(3) 粗细骨料

细骨料为级配良好的优质河砂,含泥量为 1.7%,细度模数为 2.67,表观密度为 2.535 g/cm³。粗骨料为 5~30 mm 连续级配碎石,其含泥量可忽略不计。

(4) 减水剂

减水率为 26.7% 的聚羧酸系高性能减水剂。

1.2 试验配合比设计及试件制作

试验中石灰石粉采用等质量替换水泥的添加方式,掺量从 0 变化到 30%、间隔 5%,所采用的水灰比为 0.4,具体的试验配合比如表 2 所示。

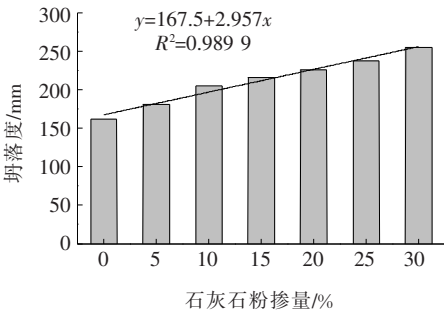


图 1 不同石灰石粉掺量下混凝土坍落度

泥混凝土的坍落度为 162 mm,而掺加 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 石灰石粉的混凝土坍落度比未添加时分别增加了 11.73%、26.54%、33.33%、39.51%、46.91%、57.41%。混凝土坍落度与石灰石粉掺量的关系近似为线性关系: $y = 2.957x + 167.5$ 。

从以上结果可以看出:石灰石粉的加入可以显著提高混凝土的坍落度,增加混凝土的流动性,改善混凝土的工作性能,更有利于混凝土的施工。石灰石粉产生这种作用的原因在于石灰石粉的形态效应及亲水性。石灰石粉表面光滑且比表面积大,在水泥浆体中起到润滑减阻的作用。随着石灰石粉掺量的增加,这种作用更为明显,由此使得混凝土的流动性明显增加。此外由于石灰石粉具有亲水性,能够将水泥水化时形成的水泥团打破从而将水释放出来,进而提高混凝土

拌和物的流动性。

3 石灰石粉对混凝土强度的影响

3.1 石灰石粉对混凝土抗压强度的影响

抗压强度是水泥混凝土最基本的力学性能指标,为研究石灰石粉掺量对抗压强度及强度增长速度的影响,该文通过对不同掺量和不同龄期的石灰石粉混凝土进行抗压强度试验,采用100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件进行抗压强度试验,石灰石粉的掺量分别为0%、5%、10%、15%、20%、25%和30%,测量龄期分别为3、7、28和56 d,试验结果见图2。

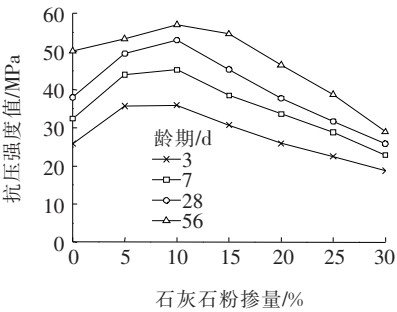


图2 不同龄期及石灰石粉掺量的混凝土抗压强度

从图2可以看到:混凝土抗压强度随石灰石粉掺量的增加呈现先增加后减小的变化规律,且不同龄期混凝土的抗压强度随石灰石粉掺量的变化规律相同。混凝土中石灰石粉的掺量从0%增加到10%时,混凝土的抗压强度有明显提高,但石灰石粉的掺量从15%继续增加至30%的过程中,混凝土的抗压强度表现为降低趋势。石灰石粉在混凝土硬化的过程中起加速作用,石灰石粉颗粒可作为成核基体使水泥浆体中的CSH在其上沉淀从而加速水化。此外,石灰石粉具有活性效应,可与水泥中铝相(铝酸三钙和铁铝酸四钙)发生反应生成水合硅铝酸钙,有利于混凝土强度的形成。同时,由于石灰石粉的粒径小,在混凝土中可以起到良好的填充作用,为此,当加入一定量的石灰石粉时,石灰石粉的填充作用提高了混凝土的密实度,改善了混凝土的级配,提高了混凝土的抗压强度。但由于石灰石粉掺量与混凝土骨架级配相互关系的制约,过量的石灰石粉不会带来更优的填充效果,反而导致水泥用量的减少,进而导致水化产物减少,混凝土的抗压强度降低。为此,从抗压强度的角度,石灰石粉的掺量不宜过多,应控制在20%以内。

3.2 石灰石粉对混凝土抗折强度的影响

抗折强度作为水泥混凝土路面的重要设计指标,

为研究石灰石粉掺量对混凝土抗折强度的影响,分别进行0%、5%、10%、15%、20%、25%和30%石灰石粉掺量的混凝土的抗折试验,得到混凝土28 d抗折强度试验结果如图3所示。

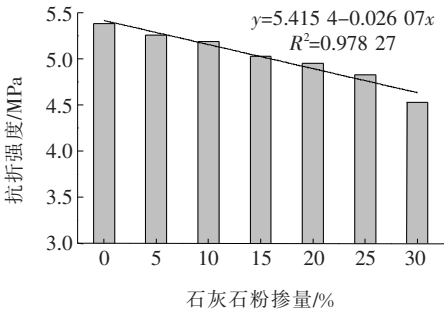


图3 不同石灰石粉掺量下混凝土28 d抗折强度

从图3可以看出:混凝土的抗折强度随着石灰石粉掺量的增加而降低。在石灰石粉掺量从0%增加到5%、10%、15%、20%、25%和30%的过程中,混凝土抗折强度从5.38 MPa分别变化为5.26、5.19、5.03、4.95、4.83和4.53 MPa。混凝土的抗折强度与石灰石粉掺量的函数关系可近似表示为: $y = -0.02607x + 5.4154$ 。对于混凝土而言,抗折强度的主要来源之一就是水泥浆体的强度以及水泥浆体与集料的界面结合强度,而石灰石粉的光滑表面等对水泥浆体强度及界面结合强度不利,为此,添加石灰石粉的混凝土抗折强度会降低,且掺量越大,影响越严重。

4 石灰石粉对混凝土耐久性的影响

水泥混凝土路面直接暴露于自然环境中,在服役过程中会受到各种环境条件的作用。冻融循环是导致混凝土劣化破坏的主要环境作用之一,为此,抗冻性常用作混凝土耐久性的评价指标之一。采用抗冻试验来研究石灰石粉掺量对混凝土耐久性的影响。抗冻试验采用规范中的快冻法进行200次冻融循环,混凝土抗冻性的评价指标采用混凝土的质量损失和相对动弹性模量。

4.1 石灰石粉对混凝土质量损失的影响

水泥混凝土在冻融循环过程中会产生损伤,混凝土表面易脱落,引起混凝土的质量损失。因此,冻融循环过程中的质量损失可以很好地评价混凝土的抗冻性。试验对各掺量下的石灰石粉混凝土均进行200次冻融循环,冻融循环过程中记录各组试件的质量,计算质量损失,结果如图4所示。

从图4可以看出:随着冻融循环次数的增加,不同石灰石粉掺量下的混凝土的质量损失均增加。普通混

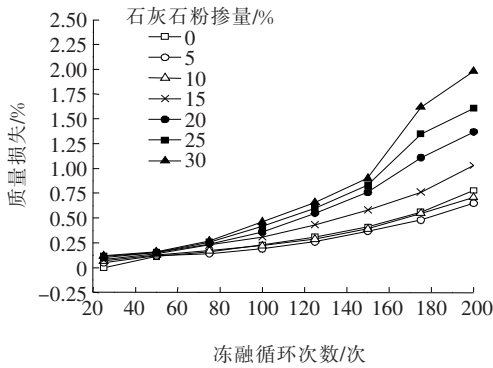


图 4 石灰石粉混凝土的质量损失随冻融循环次数的变化

凝土及 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 掺量石灰石粉混凝土经过 200 次冻融循环后质量损失分别为 0.78%、0.65%、0.71%、1.03%、1.37%、1.606% 和 1.98%。石灰石粉掺量在 10% 及以下时,石灰石粉混凝土的质量损失与普通混凝土的质量损失相差不大,甚至略小于普通混凝土。但当石灰石粉掺量为 15% 及以上时,石灰石粉混凝土的质量损失明显要比普通混凝土大。

混凝土内部存在许多的孔,混凝土冻融损伤是水分进入混凝土内部结冰后体积膨胀导致的,严重时可使混凝土开裂。为此,混凝土的抗冻性与自身的内部结构有关。石灰石粉的填充作用对提高混凝土的密实度,改善混凝土内部孔结构有利,因此试验中石灰石粉掺量在 10% 及以下时,石灰石粉混凝土的抗冻性略有提高。但掺加比例过大的石灰石粉到混凝土中时,由于取代水泥的量较大使得水化产物减少,影响混凝土的密实程度,进而导致混凝土的抗冻性变差。

4.2 石灰石粉对混凝土动弹性模量的影响

混凝土产生冻融损伤时,其动弹性模量会降低,因此可以采用动弹性模量来反映冻融损伤的程度。采用共振法测量普通混凝土及 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 掺量的石灰石粉混凝土的动弹性模量。试验结果见图 5。

从图 5 可以看出:混凝土的相对动弹性模量均随着冻融循环次数的增加而降低。经过 200 次冻融循环之后,普通混凝土及 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 掺量的石灰石粉混凝土的相对动弹性模量分别为 93.34%、94.42%、93.61%、92.12%、87.4%、83.69%、77.97%。石灰石粉的掺量在 10% 及以下时,石灰石粉混凝土的相对动弹性模量略大于普通混凝土。当石灰石粉掺量为 15% 及以上时,石灰石粉混凝土的相对动弹性模量明显要小于普通混凝土。动弹

性模量测试结果与质量损失结果一致,表明较少石灰石粉掺量对混凝土的抗冻性有利,较大石灰石粉掺量对混凝土的抗冻性不利。由以上分析可知:从混凝土抗冻耐久性的角度来看,混凝土中的石灰石粉掺量宜控制在 15% 以下。

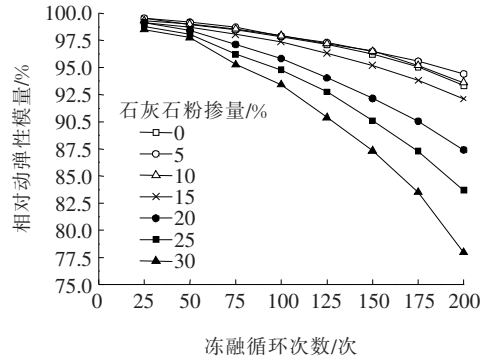


图 5 石灰石粉混凝土的相对动弹性模量随冻融次数的变化

5 石灰石粉对混凝土干缩性能的影响

混凝土的收缩引起混凝土的开裂,对于混凝土的强度和耐久性均有影响,为此,混凝土的抗裂性也是评价混凝土性能的重要指标。该文对石灰石粉掺量分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 的混凝土试件进行了 90 d 的干燥收缩试验,试验结果如图 6 所示。

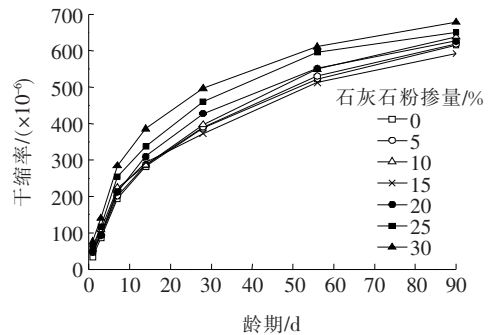


图 6 不同石灰石粉掺量混凝土的干缩率随龄期的变化

从图 6 可以看出:混凝土的干缩率随着龄期的增加而增加,在石灰石粉掺量不超过 15% 时,不同石灰石粉掺量的混凝土干缩率变化不大。当石灰石粉掺量超过 15% 时,随着石灰石粉取代水泥用量的增加,干缩不断增大,故采用过大石灰石粉掺量,对干缩不利。

6 石灰石粉对混凝土耐磨性的影响

水泥混凝土路面长期受到汽车轮胎的磨损,特别是轮胎与路面之间存在尘土砂砾时,路面的磨损更为

严重。路面磨损会降低路面的抗滑性能,影响行车安全。为此,耐磨是水泥混凝土路面使用性能的基本要求,该文通过对0%、5%、10%、15%、20%、25%和30%石灰石粉掺量的混凝土进行耐磨性试验来探究石灰石粉掺量对混凝土耐磨性的影响,试验结果见图7。

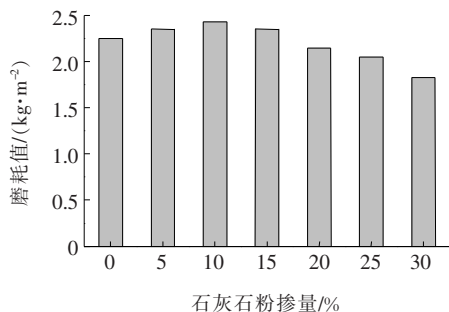


图7 混凝土磨耗值随石灰石粉掺量的变化

从图7可以看出:混凝土耐磨性随着石灰石粉掺量的增加呈现先增大后减小的变化趋势。在石灰石粉掺量为10%时,磨耗值最大。掺量超过10%后,磨耗值则随着掺量的增加而不断减小。由此可知,在混凝土中添加少量的石灰石粉能够提高混凝土的耐磨性。这是由于石灰石粉的填充效应及活性效应使得混凝土更为致密,耐磨性提高。但掺量较大时,石灰石粉替代了较多水泥且石灰石粉本身粒径较小,造成混凝土强度和刚度的降低,耐磨性降低。

综合以上分析可以看出:在混凝土中适量掺加石灰石粉有利于水泥混凝土的施工和路用性能,但掺量过高则会带来不利影响。因此,在石灰石粉水泥混凝土路面的设计中应根据具体材料试验结果严格控制石灰石粉的掺量。

7 结论

将石灰石粉等质量替代水泥用于水泥混凝土路面中,研究了0%、5%、10%、15%、20%、25%和30%的石灰石粉掺量对混凝土的工作性能、强度特性、抗冻耐久性、干缩特性以及耐磨性的影响,得到以下结论:

(1) 石灰石粉的掺量变化对混凝土的工作性能影响明显,石灰石粉可以增加混凝土的坍落度,改善混凝土的工作性能。

(2) 混凝土的抗压强度随着石灰石粉掺量先增大后减小,从抗压强度的角度考虑,石灰石粉的掺量不宜过多,宜控制在20%以内。混凝土的抗折强度则随着石灰石粉掺量的增加而不断降低。

(3) 石灰石粉的填充作用对提高混凝土的密实

度,改善混凝土内部孔结构有利,石灰石粉掺量在10%及以下时,石灰石粉混凝土的抗冻性略有提高。但超过10%后,随着石灰石粉掺量的增加,混凝土的抗冻性越来越差。

(4) 掺入适量的石灰石粉有利于混凝土耐磨性能的提高。

参考文献:

- [1] 刘建伟,张翥,申俊敏,等. 水泥混凝土路面国内外现状和发展新对策[J]. 中外公路,2016(4).
- [2] 曹鹏飞,秦鸿根,庞超明. 掺石灰石粉自密实混凝土性能的研究[J]. 施工技术,2005(s2).
- [3] 熊远柱. 高掺量石灰石粉对混凝土耐久性的影响[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2010.
- [4] 严超君. 石灰石粉不同掺量对混凝土性能的影响研究[J]. 浙江建筑,2013(4).
- [5] 陈剑雄,崔洪涛,陈寒斌,等. 掺入超细石灰石粉的混凝土性能研究[J]. 施工技术,2004(4).
- [6] G. Menéndez, V. Bonavetti, E. F. Irassar. Strength Development of Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Blast-Furnace Slag[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(1): 61-67.
- [7] S. Takami. Study on Properties of High Fluidity Hardened Concrete with Limestone Fine Powder[C]. The 5th International Symposium on Cement and Concrete, 2002. 10. 28-11. 01, Shanghai, China.
- [8] 洪锦祥,蒋林华,黄卫,等. 人工砂中石粉对混凝土性能影响及其作用机理研究[J]. 公路交通科技,2005(11).
- [9] 黄汉洋,贾丽莉,吴媛媛,等. 石灰石粉混凝土应用关键技术研究[C]. “井冈山论坛”——固废在混凝土中的应用与混凝土的可持续发展高峰论坛,2015.
- [10] Justnes H. Thaumasite Formed by Sulfate Attack on Mortar with Limestone Filler[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(8): 955-959.
- [11] 马天柱,姚佳良,姚丁. 水泥路面混凝土配合比优化设计[J]. 公路工程,2015(1).
- [12] 黄云涌,肖少华,韩春来. 路用水泥混凝土坍落度经时损失试验研究[J]. 公路工程,2011(5).
- [13] 文俊强. 石灰石粉作混凝土掺合料的性能研究及机理分析[D]. 中国建筑材料科学研究总院博士学位论文,2010.
- [14] 李晟,王沅江. 钢渣透水性水泥混凝土正交试验研究[J]. 中外公路,2016(6).
- [15] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [16] 刘策. 基于宏观性能及细观结构的多尺度道路混凝土抗盐冻性能研究[J]. 中外公路,2019(5).