

水泥稳定炉渣碎石基层路用性能

刘 栋, 李立寒, 崔华杰

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为研究生活垃圾焚烧炉渣集料对水泥稳定碎石基层路用性能的影响规律, 将 0~9.5 mm 炉渣集料按照不同比例替代天然石料制备了水泥稳定炉渣碎石混合料, 并测试了混合料的击实特性和无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量、收缩特性及抗冻性。结果表明: 炉渣集料掺量越高, 混合料最佳含水率越大且最大干密度越小; 水泥稳定炉渣碎石的抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量、抗冻性均低于水泥稳定碎石; 炉渣集料增加了试件的长期干缩变形, 但降低了试件对失水率的敏感性, 炉渣集料掺量不超过 30% 将减小试件温缩变形及对温度的敏感性。综合考虑, 炉渣集料替代水泥稳定碎石中天然石料的质量分数宜在 20%~30%。

关键词: 道路工程; 垃圾焚烧炉渣集料; 水泥稳定炉渣碎石; 性能; 掺量

中图分类号: U416.26

文献标志码: A

Pavement Performance of Cement Stabilized Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Aggregate and Crushed Stones

LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to investigate the pavement performance of cement stabilized municipal solid waste incineration bottom ash aggregate (BAA) and crushed stones, natural aggregate were replaced by BAA (0-9.5 mm) with different percentages to prepare the mixture. Then the performance including compaction characteristic, unconfined compressive strength, splitting strength, compressive modulus of resilience, shrink characteristic and frost resistance was tested. The results show that BAA increases the optimum waster and decreases the maximum density of the mixture. The unconfined compressive strength, the splitting strength, the compressive modulus of resilience and the frost resistance of the mixture contained BAA are lower than those of the control mixture. The use of BAA increases the long-term dry shrinkage strain

of the specimens, while decreases the sensitivity to water loss. Moreover, when the dosage of BAA does not exceed 30% of the aggregates, both the temperature shrinkage strain of the specimens and the sensitivity to temperature can be decreased. Based on the performance analysis, it is recommended that the dosage of BAA is 20% to 30%.

Key words: road engineering; municipal solid waste incineration bottom ash aggregate; cement stabilized BAA and crushed stones; performance; dosage

生活垃圾焚烧后的残余物包括垃圾焚烧炉渣(简称炉渣)和飞灰两大类。其中炉渣占到残余物总质量的 70%~80%, 被归为一般固体废物^[1-2]。部分国家已将炉渣纳入固废循环利用体系, 在德、法其再生利用率超过 60%, 丹麦达到 90%, 荷兰则高达 100%。而国内目前主要是将炉渣进行填埋处理, 再生利用率尚低。炉渣经预处理后具有一定的强度和良好的粒径分布, 称作垃圾焚烧炉渣集料^[3](简称炉渣集料)。炉渣集料可替代天然石料制备土木工程材料, 这有助于解决炉渣的处理问题, 同时为土木工程提供廉价原材料, 也将减少天然石料的开采, 有助于保护环境。

炉渣经高温焚烧后, 立刻经过水淬处理, 急冷过程中形成具有活性的 SiO_2 , Al_2O_3 等玻璃态物质, 体现出水硬性和较低的火山灰活性^[4-5], 属于 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 化学体系, 可磨细后用作矿料掺合料或原材料生产水泥。研究发现^[4-5], 炉渣降低了水泥强度, 但对水泥干缩性能有利。国外对炉渣集料用于水泥混凝土进行了较多的研究^[6-7], 炉渣集料对混凝土力学性能衰减作用明显, 且在混凝土中可能发生碱集料反应, 危害混凝土的耐久性能, 因此应用推广受限。国内对炉渣集料用于水泥混凝土的研究相对较少, 对炉渣集料用作水泥稳定基层材料开展

收稿日期: 2014-05-09

第一作者: 刘 栋(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路工程结构与材料。E-mail: zbyikun@163.com

通讯作者: 李立寒(1957—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为道路工程结构与材料。E-mail: lhli@tongji.edu.cn

了初步研究^[8],但尚未明确炉渣集料对基层材料性能的综合影响。

本文研究炉渣集料替代天然集料后对水泥稳定碎石基层路用性能的影响,测试混合料的击实特性、力学强度性能、收缩特性和抗冻性能,评估炉渣集料用作水泥稳定基层材料的可行性,并推荐合理的掺量。

1 试验材料

1.1 原材料

试验炉渣集料产自上海市御桥生活垃圾焚烧发电厂。炉渣集料中含有烧结熔渣、陶瓷、玻璃、砖石、少量金属及未燃物。炉渣集料粒径范围为 0~9.5 mm,通过 0.075 mm,2.36 mm,4.75 mm 筛孔的质量百分率分别为 2.3%,23.5%,93.1%。为测试炉渣集料性能,人工筛分为 3 组粒径,测试结果见表 1。试验石灰岩集料的粒级规格、压碎值、密度和吸水率见表 1。由表 1 可见,炉渣集料具有明显区别于石灰岩集料的特性,其强度、密度较低,吸水率较高。试验水泥为江苏太仓产海螺牌 32.5 级复合硅酸盐水泥。

表 1 炉渣集料及石灰岩集料的基本性能

Tab. 1 Basic properties of bottom ash aggregate and limestone aggregate

集料类型	粒径/mm	压碎值/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/ %
炉渣集料	>0~2.36		2.272	
	>2.36~4.75	30.0	2.410	7.00
	>4.75~9.50	38.7	2.198	7.20
石灰岩集料	>0~2.36		2.401	
	>2.36~4.75	18.7	2.725	0.65
	>4.75~13.20	28.4	2.719	0.54
	>13.20~26.50	29.1	2.715	0.48

1.2 混合料组成

将 0~9.5 mm 炉渣集料按照 0,10%,20%,30%,40%的质量比例替代石灰岩集料制备水泥稳定炉渣碎石混合料(含炉渣集料和石灰岩集料的水泥稳定混合料)。混合料代号分别为 LZ-0,LZ-10,...,LZ-40。按照图 1 中混合料级配范围进行配合比设计,设计结果见表 2。试验混合料合成级配曲线见图 1。由图 1 可见,LZ-40 的级配曲线靠近级配上限,混合料为悬浮密实结构;其余混合料级配曲线较接近,为骨架密实结构。试验混合料水泥质量分数均采用 4.5%。

表 2 混合料配合比

Tab. 2 Mix proportion of mixture

混合料 代号	不同材料的质量分数/%				炉渣 集料
	石灰岩集料/mm				
	>13.2~ 26.5	>4.75~ 13.2	>2.36~ 4.75	>0~ 2.36	
LZ-0	20	30	25	25	0
LZ-10	20	30	25	15	10
LZ-20	20	30	20	5	20
LZ-30	20	30	20	0	30
LZ-40	20	30	10	0	40

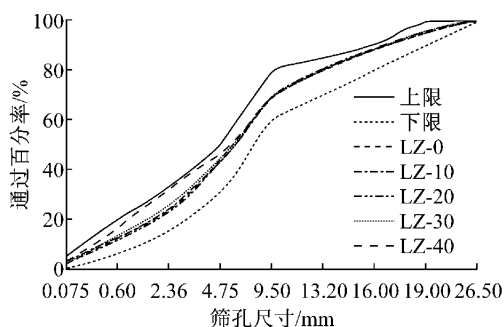


图 1 混合料级配曲线

Fig. 1 Grading curve of mixture

2 试验方法

2.1 试件制备与养生

击实试验依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51—2009)》^[9]中 T0804—1994 进行。依据混合料击实试验结果,在最佳含水率下,以最大干密度的 98%静力压实成型 $\Phi 100$ mm $\times$ 100 mm 圆柱体试件和 10 cm $\times$ 10 cm $\times$ 40 cm 的中梁试件。梁试件用于干缩试验和温缩试验,其余试验采用圆柱体试件。试件成型后用塑料薄膜包裹,在温度为 25℃、相对湿度为 95%的标准环境下养生至不同龄期。

2.2 试验方法

试验方法主要参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51—2009)》。无侧限抗压强度试验、劈裂试验分别依据 T0805—1994 和 T0806—1994 进行,试件养生龄期分别为 7,28,90 d。静态抗压回弹模量试验、动态抗压回弹模量试验分别依据 T0808—1994 和 T0857—2009 进行,试件养生龄期分别为 28,90 d。干缩试验中试件养生 6 d 后浸水 24 h,之后试件放在 20℃左右的室内自然湿度下风干,千分表安置在试件顶部测量竖向变形,另一组平行试件在相同条件下测试失水率;温缩试验参照 T0855—2009 进行,试件养生 28 d,测试试件从 50

℃降至 0℃ 的温缩应变. 抗冻性试验依据 T0858—2009 进行,试件养生龄期为 28 d.

3 试验结果与分析

3.1 击实特性

混合料击实试验结果见表 3. 由表 3 可见,随着炉渣集料掺量的增加,混合料的最佳含水率增加,最大干密度减小. 炉渣集料掺量每增加 10%,混合料最佳含水率平均增大约 1.2%,最大干密度则减小约 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 这是因为炉渣集料吸水率高于石灰岩集料,密度则低于石灰岩集料.

表 3 击实试验结果

Tab.3 Test results of compaction

混合料代号	最佳含水率/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
LZ-0	5.3	2.401
LZ-10	6.3	2.299
LZ-20	7.5	2.202
LZ-30	9.3	2.122
LZ-40	10.0	2.042

3.2 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度试验结果见图 2. 由图 2 可见,在各个龄期下,水泥稳定炉渣碎石的抗压强度低于水泥稳定碎石. 试件抗压强度随养生龄期延长而增大. 不同养生龄期时,抗压强度随炉渣集料掺量的变化规律不同. 随炉渣集料掺量的增加,试件 7 d 抗压强度呈降低趋势,28 d 抗压强度呈先降低后升高的趋势;炉渣集料掺量不超过 30% 时,对试件 90 d 抗压强度影响较小.

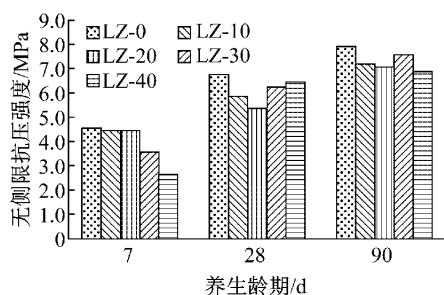


图 2 无侧限抗压强度试验结果

Fig.2 Test results of unconfined compressive strength

由于炉渣集料的强度低于石灰岩集料,在水泥稳定碎石中替代部分石灰岩集料后,会影响试件的抗压强度,当炉渣集料替代量较高、试件养生时间较短时,这种影响更为显著. 然而,炉渣集料中的 SiO_2 及 Al_2O_3 等活性物质在水泥水化物激发下发生火山灰反应,对试件强度起到积极作用,且这种反应具有

时间依赖性,主要发生在养生的中后期. 在炉渣集料自身强度较低、但具有火山灰活性的综合作用下,炉渣集料掺量对试件强度的影响变得颇为复杂.

在 4.5% 的水泥质量分数下,当炉渣集料掺量不超过 30% 时,试件抗压强度降低幅度不大,7 d 无侧限抗压强度在 3.5~4.5 MPa,能够满足我国对重交通公路路面基层材料的技术要求^[10].

3.3 劈裂强度

劈裂试验结果见图 3. 由图 3 可见,除 LZ-30 的 28 d 劈裂强度略高于同期 LZ-0 外,其余水泥稳定炉渣碎石的劈裂强度均低于水泥稳定碎石. 不同养生龄期时,试件劈裂强度随炉渣集料掺量的变化规律不同. LZ-40 的 7 d 劈裂强度、LZ-30 的 28 d 劈裂强度高于同期其余试件;随着炉渣集料掺量的增加,试件 90 d 劈裂强度则呈降低趋势.

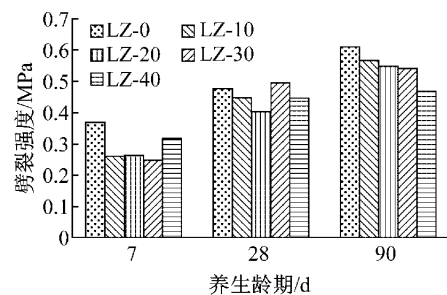


图 3 劈裂强度试验结果

Fig.3 Test results of splitting strength

水泥稳定炉渣碎石的劈裂强度是集料强度、炉渣集料活性及混合料内部黏聚力的综合体现. 炉渣集料强度低于石灰岩集料,这是水泥稳定炉渣碎石劈裂强度普遍低于水泥稳定碎石的主要原因. 另外,炉渣集料的孔隙结构促进水泥浆渗入集料,炉渣集料中活性物质在水化过程中的生成物均使得水泥石及其与集料界面区的强度提高,这是 LZ-30, LZ-40 的短期劈裂强度较高的原因. 而 LZ-30, LZ-40 的后期劈裂强度增长明显放缓,这是因为水泥的水化反应、炉渣集料活性已发挥相当部分,对劈裂强度的贡献已较小.

炉渣集料掺量不超过 40% 时,试件的 90 d 劈裂强度不小于 0.4 MPa,满足规范对公路路面水泥稳定类基层材料的技术要求^[10].

3.4 抗压回弹模量

静态模量试验结果见图 4. 由图 4 可见,除 LZ-30 的 90 d 静态模量略高于同期 LZ-0 外,水泥稳定炉渣碎石的静态模量低于水泥稳定碎石. 试件的静态模量随养生龄期增长,水泥稳定炉渣碎石的增长

速率略大于水泥稳定碎石. 水泥稳定炉渣碎石的 28 d, 90 d 静态模量的平均水平约为同龄期 LZ-0 的 85% 和 90%.

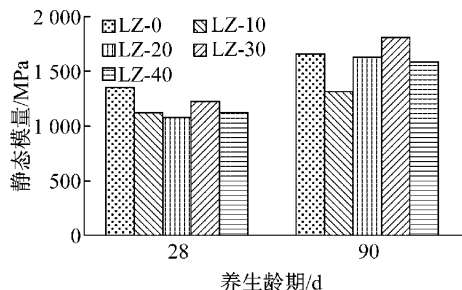


图 4 静态模量试验结果

Fig. 4 Test results of static resilience modulus

动态模量试验结果见图 5. 由图 5 可见, 除 LZ-20, LZ-30 的 90 d 动态模量高于同期 LZ-0 外, 水泥稳定炉渣碎石的动态模量低于水泥稳定碎石, 这与静态模量试验结果基本一致. 随着荷载级位的增大, 试件动态模量增大, 这表明动态模量存在应力依赖. 试件的动态模量随养生龄期增大. 荷载级位 0.75 MPa 下, 水泥稳定炉渣碎石的 28 d, 90 d 动态模量的平均水平约为同龄期 LZ-0 的 90% 和 95%.

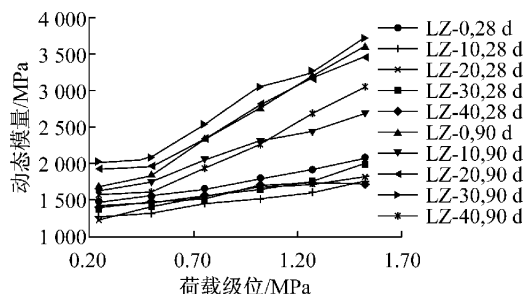


图 5 动态模量试验结果

Fig. 5 Test results of dynamic resilience modulus

炉渣集料孔隙多、模量低, 随着炉渣集料掺量的增加, 试件中的孔隙增多、低模量相体积增大, 在受力相同时, 其变形量增大, 试件抗压回弹模量降低. LZ-30 的 90 d 无侧限抗压强度较高, 这减小了试件在荷载下的变形量, 相应的抗压回弹模量增大.

水泥稳定炉渣碎石的抗压回弹模量在总体上低于水泥稳定碎石, 但炉渣集料掺量在 20%~30% 时混合料的长期抗压回弹模量有超过水泥稳定碎石的趋势.

3.5 收缩特性

干缩应变与放置时间的关系见图 6. 由图 6 可见, 试件的干缩应变随放置时间以近似线性的速率增长. 随着炉渣集料掺量的增加, 试件的前期干缩应

变呈降低趋势, 当炉渣集料掺量不超过 20% 时, 试件 15 d 前的干缩应变与 LZ-0 接近. 但 LZ-0 的干缩应变在 15 d 左右后增长幅度明显变缓. 平均干缩系数与放置时间的关系见图 7. 由图 7 可见, 试件的平均干缩系数随放置时间而增大; 随着炉渣集料掺量的增加, 干缩系数呈降低趋势.

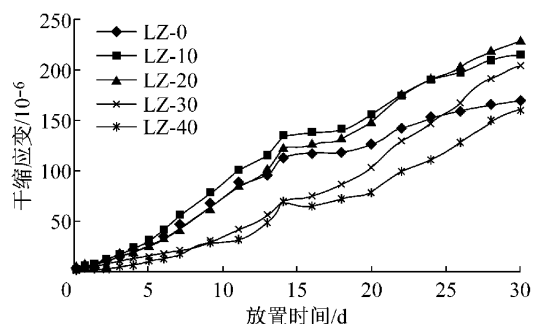


图 6 干缩应变与放置时间的关系

Fig. 6 Dry shrinkage strain versus uncovering time

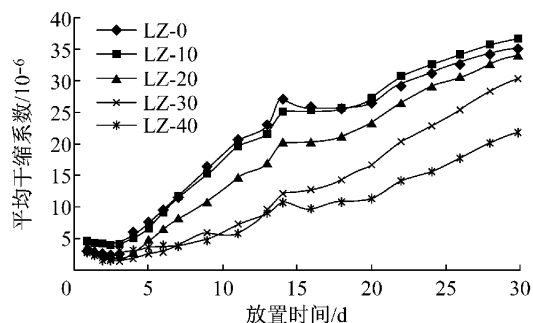


图 7 平均干缩系数与放置时间的关系

Fig. 7 Average dry shrinkage index versus uncovering time

随着炉渣集料掺量的增加, 试件密度降低, 在水泥用量固定时, 试件中的实际水泥质量相对减少, 水泥硬化体中水化硅酸钙(C-S-H)凝胶减少, 收缩源减少; 试件含水率虽然随炉渣集料掺量增加而增大, 但相当部分水被炉渣集料所吸收, 这部分水散失较慢, 在失水过程中有助于混合料自身的内部养生. 但 15 d 之后水泥稳定炉渣碎石的失水率增长速率高于 LZ-0, 导致干缩应变的增长速率大于 LZ-0.

炉渣集料虽增加了试件的长期干缩变形, 但降低了试件对失水率的敏感性. 半刚性基层材料经铺筑面层后维持在某一含水率, 干缩变形也将维持在一定水平. 因此, 水泥稳定炉渣碎石基层施工完成后应该加强保湿措施, 防止水分过快、过多蒸发, 并尽快铺筑沥青面层, 可保证基层不会发生过大干缩变形.

温缩应变试验结果见表 4. 由表 4 可见, 炉渣集

料掺量 20% 时,试件的总温缩应变取得最小值。温缩系数与试验温度的关系见图 8。由图 8 可见,随着试验温度的降低,温缩系数减小;炉渣集料掺量 20% 时,试件的温缩系数取得最小值。

表 4 温缩应变试验结果

Tab.4 Test results of temperature shrinkage strain

混合料代号	LZ-0	LZ-10	LZ-20	LZ-30	LZ-40
总温缩应变	373.9	373.4	350.6	417.3	395.3

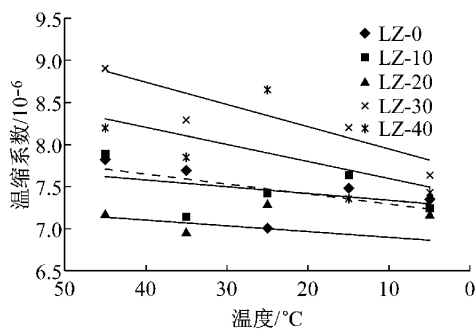


图 8 温缩系数与温度的关系曲线

Fig.8 Shrinkage coefficient versus temperature

水泥稳定碎石的温缩应变与集料、水泥石的收缩量及弹性模量有关。一方面,炉渣集料的弹性模量低于石灰岩集料,在相同温缩应力作用下,高掺量炉渣集料的试件收缩量增大;另一方面,炉渣集料与水泥水化反应过程中会有更多的生成物,这些次生矿物的增加,使试件的温缩应变增大。

炉渣集料掺量在 20% 左右时,可减小试件温缩应变及对温度的敏感性,从而减小道路基层因温度变化而导致开裂的可能。

3.6 抗冻性能

以抗冻指数评价试件的抗冻性。抗冻指数为试件冻融后抗压强度与冻融前抗压强度的比值,该值越大,试件抗冻性越好。冻融试验结果见表 5。由表 5 可见,水泥稳定炉渣碎石的抗冻指数普遍低于水泥稳定碎石,其中 LZ-20 和 LZ-30 的抗冻指数在 85% 左右,而 LZ-10, LZ-40 的抗冻指数均低于 80%。

表 5 冻融试验结果

Tab.5 Results of freezing and thawing test %

混合料代号	LZ-0	LZ-10	LZ-20	LZ-30	LZ-40
抗冻指数	92.4	67.8	84.8	84.5	76.5

炉渣集料孔隙较天然石料多,试件吸水率较大,加剧了水侵入及冻胀;但随着炉渣集料掺量的增加,炉渣集料火山灰反应的生成物增多,混合料内部结构致密性增加,冻胀对试件的破坏作用降低。经综合

分析后可得,炉渣集料掺量 20%~30% 左右时试件抗冻性最佳,可用于季节性冰冻地区。炉渣集料掺量过高或过低对试件抗冻性影响均较大,用于季节性冰冻地区可能存在强度不足的问题。

4 讨论

试验分析表明,炉渣集料影响水泥稳定基层路用性能的主要原因为其高吸水率、低强度及其具有化学活性等特点。为保证水泥稳定炉渣碎石混合料路用性能满足规范要求,参考现有道路技术规范,并依据前期研究成果编制了《道路工程生活垃圾焚烧炉渣集料应用技术规程(SMHTA/T08—2013)》^[11],对炉渣集料的 pH 值、表观密度、吸水率及压碎值等指标提出了具体要求。

根据本文研究成果,2013 年 10 月在上海某市政道路铺筑了 100 m 左右的水泥稳定炉渣碎石基层试验路。该种基层材料的施工技术与常规水泥稳定碎石混合料无明显区别。为保证水泥稳定炉渣碎石基层不产生过高的长期干缩变形,在养生阶段应保证足够湿度,并尽快铺筑沥青混合料面层。试验路性能跟踪检测发现,水泥稳定炉渣碎石基层的性能良好,路面未发生破坏。

5 结论

(1) 水泥稳定炉渣碎石混合料的最佳含水率高于水泥稳定碎石,最大干密度则较低,且随着炉渣集料掺量的增加,混合料的最佳含水率增加,最大干密度降低。

(2) 水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量普遍低于水泥稳定碎石。

(3) 炉渣集料降低了试件的短期干缩变形和对失水率的敏感性,但增加了试件的长期干缩变形。炉渣集料掺量在 20% 左右时可减小试件温缩应变及对温度的敏感性。

(4) 掺入炉渣集料后试件的抗冻性下降,炉渣集料掺量 20%~30% 时试件的抗冻性较高。

(5) 综合试验结果认为:0~9.5 mm 粒径炉渣集料替代水泥稳定碎石中天然集料的比例宜在 20%~30%,此时混合料的力学性能、路用性能较好,可满足目前规范对基层材料强度的要求。

(下转第 415 页)