

生活垃圾焚烧炉渣集料基本性质及其对水泥稳定碎石性能影响的研究

苏凯^{1,2}, 张绪国²

(1.上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200031; 2.上海城投研究总院, 上海市 200031)

摘要:生活垃圾焚烧炉渣集料(炉渣集料)具有连续的级配分布、一定的强度性能和潜在的水硬性能,可替代天然集料应用在水泥稳定碎石中。但炉渣集料基本性能对水泥稳定碎石的强度性能的影响尚不明晰。首先,对不同产地炉渣集料的基本性能进行研究;其次,以炉渣集料替代一定比例、同粒径的天然集料,进行水泥稳定炉渣碎石的配合比设计,基于无侧限抗压强度试验确定不同掺量炉渣集料的水泥稳定炉渣碎石的强度性能;最后,基于相关性分析,确定炉渣集料基本性能对水泥稳定炉渣碎石击实特性和强度性能的影响。试验结果表明:水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率随炉渣集料掺量增加而增大、最大干密度随炉渣集料掺量增加而减小;随着炉渣集料掺量增加,水泥稳定炉渣碎石的强度逐渐降低,且水泥稳定干法炉渣碎石的强度高于水泥稳定湿法炉渣碎石强度。水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率与炉渣集料的吸水率相关性较高;水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度与炉渣集料的密度、吸水率和烧失量呈正相关、与炉渣集料的压碎值呈负相关。

关键词:道路工程;炉渣集料;水泥稳定炉渣碎石;组成设计;性能评价

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2021)03-0173-06

0 引言

目前,城市生活垃圾清运量逐年上升,中国城市环境卫生协会2016年统计,我国每年产生近10亿t垃圾,其中生活垃圾产生量约4亿t,建设垃圾5亿t左右,此外,还有餐厨垃圾1000万t左右。处理城市生活垃圾的主要方法主要有三种^[1-3],分别为填埋法、堆肥法以及焚烧法。虽然填埋法和堆肥法处理成本低廉,技术要求低下,但它们都有一个共同的缺点——占地面积巨大。在城市生活垃圾日益增多,土地资源也日益紧张的形势下,现行的填埋、堆肥等处理方法已远远不能满足处理需求。焚烧法在垃圾燃烧同时还能用于火力发电,实现能量回收,并且垃圾燃烧的主要副产物——炉渣^[4-7],具有一定的强度、级配以及水化特性,经过处理之后可以代替部分天然集料应用于道路工程中。

为了探明炉渣集料代替天然集料应用于道路工程中的可能性,范晓平、邢介明、童琳等人^[8]采用SEM电镜扫描了炉渣,发现焚烧炉渣中Ca、Fe、Si、Al等元素含量较高,与天然集料的元素组成十分相

似。章骅、何品晶、邵立明等人^[9]研究了炉渣的浸出特性,发现炉渣的重金属浸出毒性远低于国家标准,属于一般固体废弃物,回收再利用时,对环境危害小,炉渣中的重金属元素在自然条件下较为稳定,不会对环境造成较大危害。王璘晨^[10]发现,掺炉渣的沥青混合料有着良好的应用前景,但目前投入实际应用较少,主要原因在于推广时会遇到以下三种问题:(1)混合料的设计沥青用量偏高(0~9.5mm炉渣掺量每增加10.0%,设计沥青用量增加约0.7%);(2)炉渣利用率偏低(15%以下);(3)炉渣沥青混合料的性能不甚稳定。刘栋、李立寒、崔华杰^[11]等人发现,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。

综上,炉渣集料无毒无害,并且在物理特性以及化学特性上类似于天然集料。炉渣产量极大,如果能代替天然集料掺入沥青混合料或者水泥稳定碎石混合料中,具有较高的经济价值,实现固体废弃物的再利用,符合绿色经济环保的可持续发展理念。然而炉渣集料的基本性能不如天然集料,并且变异性较大。在沥青混凝土道路结构中,基层一般为水泥稳定碎石半刚性基层,性能要求相对于面层更低,更加适合掺加炉渣集料^[12],而炉渣集料基本性能对水泥稳定碎石

收稿日期:2020-10-30

作者简介:苏凯(1977—),男,博士,高级工程师,主要从事道路工程科研、咨询、管理工作。

的强度性能的影响尚不明晰,阻碍了炉渣集料在道路工程中的应用推广。为了更好地实现炉渣的再利用,本文研究分析了炉渣水泥稳定碎石的击实特性与强度特征,并采用相关性分析的统计学方法,研究了炉渣基本性能对炉渣水泥稳定碎石性能的影响。

1 试验材料

1.1 炉渣集料

水泥稳定炉渣碎石采用源自不同产地的2种干法炉渣集料(G1、G2)和5种湿法炉渣集料(S1、S2、S3、S4、S5),各炉渣集料的级配组成见表1。

表1 炉渣集料筛分试验结果

炉渣集料 批次	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
G1	100	100	100	100	93.1	23.5	39.4	2.3
G2	100	99.8	99.6	98.3	83.7	63.0	38.7	9.5
S1	100	100	97.5	69.9	8.3	3.0	1.7	0.7
S2	100	100	98.8	98	86.1	66.8	42.7	8.7
S3	100	100	97.5	83.8	16.9	6.4	3.5	1.3
S4	100	100	100	99.8	91.0	71.5	31.6	6.6
S5	100	100	100	99.7	89.0	62.7	29.4	7.2

1.2 石灰岩集料

水泥稳定炉渣碎石采用4档石灰岩集料。由于水泥稳定炉渣碎石制样时间存在差异,因此,水泥稳定干法炉渣碎石和水泥稳定湿法炉渣碎石采用的石灰岩集料的级配略有差异。水泥稳定干法炉渣碎石采用的石灰岩集料的粒级为:0~4.75 mm、4.75~9.5 mm、9.5~19 mm和19~31.5 mm;水泥稳定湿法炉渣碎石采用的石灰岩集料的粒级为:0~3 mm、3~5 mm、5~15 mm和15~25 mm。各档石灰岩集料的级配组成见表2。

表2 石灰岩集料筛分试验结果

石灰岩集料/mm	通过下列筛孔的质量百分率/%									
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
A	19~31.5	100	96.0	40.3	15.3	5.9	1.8	1.3	0	0
	9.5~19	100	96.8	95.5	87.2	70.6	41.6	14.1	8.1	0
	4.75~9.5	100	100	100	99.7	95.6	77.0	35.2	17.9	10.1
	0~4.75	100	100	100	100	100	98.2	86.7	56.5	29.9
B	15~25	100	84.8	7.7	1.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	5~15	100	100	100	100	98.4	76.7	18.9	4.4	3.2
	3~5	100	100	100	100	100	98.5	78.2	35.9	13.0
	0~3	100	100	100	100	100	99.4	97.7	85.0	44.5

1.3 水泥

水泥稳定炉渣碎石采用江苏太仓生产的海螺牌32.5级复合硅酸盐水泥。水泥用量为4.5%。

2 试验方案

2.1 炉渣集料基本性能试验

炉渣集料的密度、吸水率、压碎值和烧失量等基本性能参照《公路工程集料试验规程》(JTG E20—2005)^[13]中的相应试验方法执行。

2.2 击实试验

水泥稳定炉渣碎石中炉渣集料的掺量分别为0%、10%和30%。依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[14]中的击实法试验T0804—1994确定水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率和最大干密度。

2.3 无侧限抗压强度试验

水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[14]中相应试验方法T0805—1994执行。根据击实试验结果,以98%压实度成型试件。试样尺寸为Φ10 cm×10 cm,在标准养生条件下养生28 d后,进行无侧限抗压强度的测试。根据试验结果,按式(1)计算水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度。

$$R_c = \frac{P}{A}$$
 (1)

式中: R_c 为试件的无侧限抗压强度,MPa; P 为试件破坏时的最大压力,N; A 为试件的截面积,mm²。

3 试验结果与讨论

3.1 炉渣集料基本性能试验结果

表3为炉渣集料的表观相对密度、吸水率、压碎值和烧失量试验结果。由表3可见,四种炉渣集料的

表观相对密度分布在 2.270~2.428 之间,明显小于天然集料的表观相对密度。炉渣集料的吸水率为 4.00%~7.94%,变异系数为 0.293。炉渣集料的吸水率明显高于天然集料,这主要是由于炉渣集料中含有多孔熔渣和高吸水性的砖石所致。同时,不同产地的炉渣集料的物质组成(玻璃、陶瓷、砖石、熔渣等比例)存在差异,这也造成了不同产地炉渣集料吸水率的变异性。四种炉渣集料的压碎值分布在 29.7%~41.7%,明显高于天然集料,这也是由于炉渣集料中含有易碎的玻璃、陶瓷等物质所致。炉渣集料的 600℃烧失量分布在 2.10%~9.07%、950℃烧失量分布在 6.16%~18.04%,表明炉渣集料中含有较多的有机质、矿物成分和碳酸盐等。

表 3 炉渣集料的基本性能试验结果

炉渣集料类型	G1	G2	S1	S2	变异系数
表观相对密度	2.428	2.371	2.270	2.303	0.030
吸水率 /%	7.94	6.50	5.04	4.00	0.293
压碎值 /%	34.7	29.7	41.7	37.9	0.141
600℃烧失量 /%	9.07	7.26	2.10	5.05	0.512
950℃烧失量 /%	18.04	11.64	6.50	6.16	0.526

3.2 水泥稳定炉渣碎石配合比设计与击实特性

水泥稳定炉渣碎石的级配组成曲线如图 1 所示。水泥稳定炉渣碎石的击实试验结果见表 4。由表 4 可见,与水泥稳定碎石相比,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率增加、最大干密度减小,且随着炉渣集料掺量的增加,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率进一步增大、最大干密度进一步减小。这主要是由于炉渣集料的密度小于天然集料、吸水率高于天然集料所致。当以不同产地炉渣集料制备水泥稳定炉渣碎石时,水泥稳定炉渣碎石的击实特性存在一定的差异。当掺加 10%炉渣集料时,水泥稳定炉渣碎石最佳含水率的变异系数为 0.092、最大干密度的变异系数为 0.007;当掺加 30%炉渣集料时,水泥稳定炉渣碎石最佳含水率的变异系数为 0.195、最大干密度的变异系数为 0.027。这主要是由于不同产地炉渣集料的密度、吸水率存在差异所致。

3.3 水泥稳定炉渣碎石强度特征

水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度结果如图 2 所示。由图 2 可见,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度一般均小于对照组水泥稳定碎石的无侧限抗压强度。同时,随着炉渣集料掺量的增加,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度进一步减小,这主要是

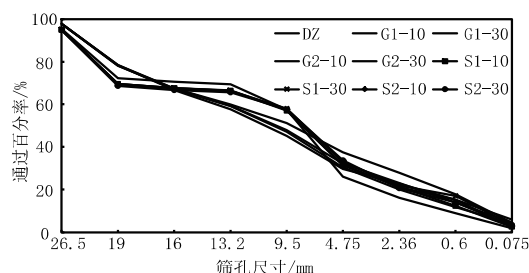


图 1 水泥稳定炉渣碎石级配组成曲线

表 4 水泥稳定炉渣碎石击实试验结果

炉渣集料	击实特性参数	炉渣集料掺量 /%		
		0	10	30
G1	最佳含水率 /%	5.3	6.3	9.3
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.401	2.299	2.122
G2	最佳含水率 /%	5.3	7.0	10.6
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.401	2.256	2.112
S1	最佳含水率 /%	5.282	5.295	6.263
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.317	2.280	2.229
S2	最佳含水率 /%	5.282	6.700	7.359
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.317	2.271	2.250
S3	最佳含水率 /%	5.282	6.227	6.969
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.317	2.291	2.140
S4	最佳含水率 /%	5.282	7.023	7.522
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.317	2.299	2.117
S5	最佳含水率 /%	5.282	6.548	6.943
	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	2.317	2.278	2.196

由于炉渣集料的压碎值较高、炉渣集料与水泥间的粘附性能较差所致。当掺加干法炉渣集料时,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度明显高于掺加湿法炉渣集料的水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度。这主要是由于干法炉渣集料和湿法炉渣集料的处理工艺不同,二者的强度性能和胶凝性能的差异所致。

对于干法炉渣集料而言,掺加 G1 炉渣时的无侧限抗压强度略高于掺加 G2 炉渣的强度。当 G1 炉渣掺量为 10%和 30%时,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度依此为对照组水泥稳定炉渣碎石的 89%和 77%。对于湿法炉渣集料而言,掺加 S2 炉渣时的无侧限抗压强度略高于掺加 S1 炉渣的强度。当 S2 炉渣掺量为 10%和 30%时,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度依此为对照组水泥稳定炉渣碎石的 80%和 62%。

3.4 水泥稳定炉渣碎石性能与炉渣集料基本性能的关联性分析

3.4.1 击实特性

图 3 为水泥稳定炉渣碎石最佳含水率与炉渣集

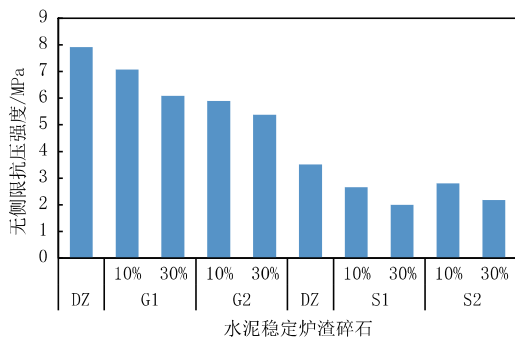
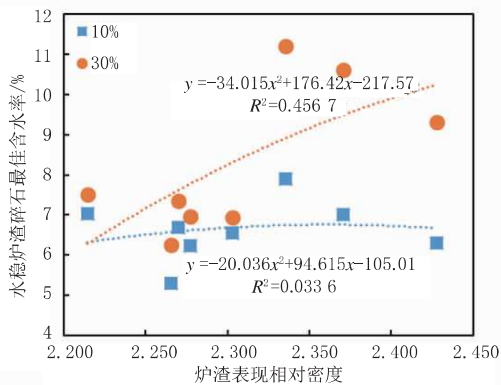
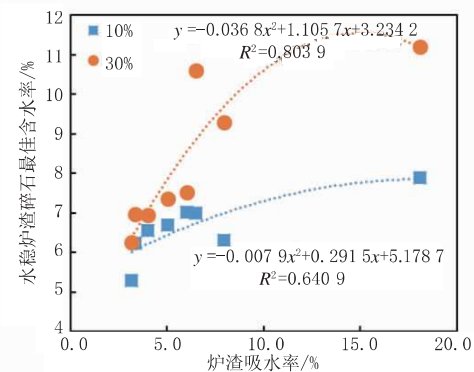


图2 无侧限抗压强度试验结果(DZ:对照组水泥稳定碎石)

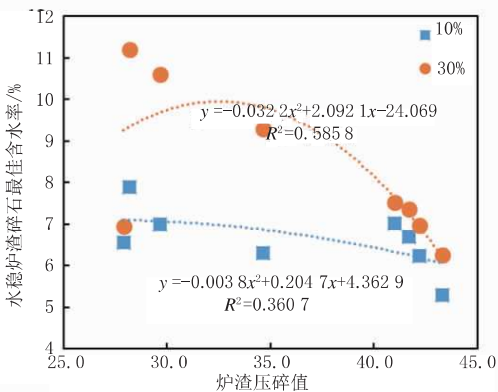
料基本性能的相关性分析。如图3所示,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率与炉渣集料的表观相对密度、吸水率呈正相关关系,与炉渣压碎值呈负相关关系。



(a) 炉渣集料表观相对密度影响



(b) 炉渣集料吸水率影响



(c) 炉渣集料压碎值影响

图3 炉渣水泥稳定碎石最佳含水率与炉渣集料基本性能的相关性分析

不同炉渣集料掺量下,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率与炉渣集料的表观相对密度和压碎值的相关性较低,这表明,炉渣集料的表观相对密度和压碎值不是影响水泥稳定炉渣碎石最佳含水率的关键因素。相反,不同炉渣集料掺量下,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率与炉渣集料的吸水率具有很好的相关性($R^2 > 0.6$)。当掺加10%炉渣集料时,炉渣吸水率与水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率的相关系数为0.6409;当掺加30%炉渣集料时,炉渣吸水率与水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率的相关系数增加到0.8039。这表明,随着炉渣集料掺量的增加,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率与炉渣集料吸水率的关联性越来越高。此外,随着炉渣集料掺量的增加,炉渣集料吸水率对水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率的影响逐渐增大,在图中表现为相关性曲线斜率的增加。

3.4.2 强度特性

水泥稳定炉渣碎石强度性能的差异与炉渣集料自身的密度、压碎值、吸水率等基本性能指标具有一定关系。这种相关性分析有利于更好的明晰炉渣集料基本性能对水泥稳定炉渣碎石强度的影响。由于G1、G2和S1、S2两组所采用的石灰岩不同,造成对照组水泥稳定碎石的无侧限抗压强度相差较大。为了消除石灰岩集料对混合料强度性能的影响,将水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度分别除以相应对照组水泥稳定碎石的无侧限抗压强度得到相对无侧限抗压强度,并用该指标进行后续与炉渣集料基本性能的相关性分析。

图4为水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度与炉渣集料基本性能的相关性分析结果。如图4所示,水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度与炉渣集料的烧失量呈现正相关关系。炉渣的600℃烧失量和950℃烧失量可以表征炉渣集料的有机质和碳酸盐的含量。这表明,炉渣集料中的有机质和碳酸盐的存在有利于提高水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度。

水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度与炉渣集料的表观相对密度呈现正相关关系,相关系数达到0.7以上。这表明随着炉渣集料密度的增加,水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度逐渐增大。炉渣集料密度的增加更有利于水泥稳定炉渣碎石形成密实的结构,有利于其强度的形成。

水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度与炉

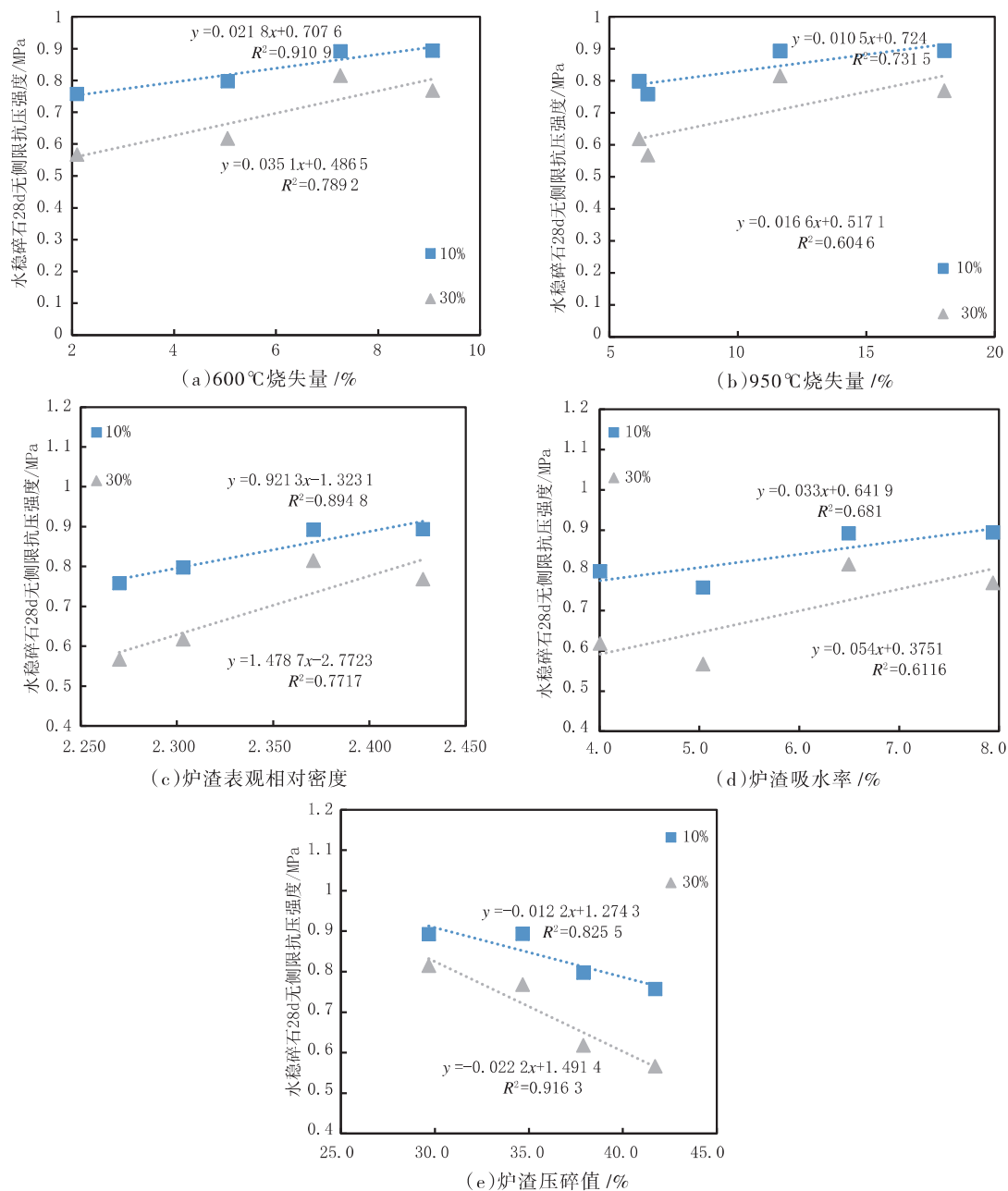


图4 水泥稳定炉渣碎石强度特性与炉渣集料基本性能的相关性分析

渣集料的吸水率呈现正相关关系,相关系数达到0.6以上。这表明随着炉渣集料吸水率的增加,水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度逐渐增大。炉渣集料中的熔渣成分具有一定的化学活性,在水的参与下可以产生水化反应,具有明显的胶凝现象。随着炉渣集料吸水率的增加,炉渣集料在水的参与下的水化反应更剧烈,更有利于水泥稳定炉渣碎石强度的形成。

水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度与炉渣集料的压碎值呈现负相关关系,相关系数达到0.8以上。这表明随着炉渣集料压碎值的增加,水泥稳定炉渣碎石的相对无侧限抗压强度逐渐减小。炉渣集料的压碎值显著高于天然集料,因此炉渣集料的压

碎值大小是影响水泥稳定炉渣碎石无侧限抗压强度的关键因素。炉渣集料是由玻璃、陶瓷、砖石、熔渣等成分组成的复合材料。当炉渣集料中玻璃、陶瓷等易碎物质的含量增加时,炉渣集料的压碎值明显增加。这会导致水泥稳定炉渣碎石的结构强度明显减小,也会降低其与水泥间的黏结性能。

4 结论

(1) 炉渣集料掺量越高,水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率越大、最大干密度越小;

(2) 炉渣集料的掺量和处理工艺会显著影响水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度。随着炉渣集料掺量的增加,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度逐

渐减小。当掺加干法炉渣时,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度高于掺加湿法炉渣的水泥稳定炉渣碎石的强度;

(3)炉渣集料的吸水率会显著影响水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率,而炉渣集料的表观相对密度和压碎值对水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率无明显影响;

(4)基于相关性分析,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度与炉渣集料的表观相对密度、吸水率和烧失量呈正相关关系,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度与炉渣集料的压碎值呈负相关关系。

参考文献:

- [1] 刘栋,李立寒,崔华杰.炉渣集料对沥青混合料性能影响的试验研究[J].建筑材料学报,2015,18(2):307-311.
- [2] 张明杰.固废粉料及其沥青胶浆的性能评价[D].上海:同济大学,2017.
- [3] 张磊,孙琪琛,刘宁,等.中国城市生活垃圾焚烧处理分析[J].环境与发展,2018,30(6):32-33,36.
- [4] Pasetto M, Baldo N. Laboratory investigation on foamed bitumen

bound mixtures made with steel bottom ash, foundry sand, bottom ash and reclaimed asphalt pavement [J]. Road Materials&Pavement Design. 2012, 13(4): 691-712.

- [5] Ogunro VO, Inyand HI, Hooper F, et.al. Gradation control of bottom ash aggregate in superpave bituminous mixes[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6):604-613.
- [6] 李伟雄,张肖宁.水泥稳定碎石集料级配变异对无侧限抗压强度的影响[J].中外公路.2011,31(1):213-216.
- [7] 杨昆.生活垃圾焚烧炉渣在沥青混合料中的应用研究[D].上海:同济大学,2016.
- [8] 范晓平,邢介明,童琳,等.生活垃圾焚烧灰渣的物理化学特性[J].环境卫生工程,2009,19(3):4-6
- [9] 章骅,何晶晶,邵立明,等.生活垃圾焚烧炉渣再生集料利用[C]//首届全国再生混凝土研究与应用学术交流会议论文集.上海:同济大学,2008:151-156.
- [10] 王璵晨.生活垃圾焚烧炉渣性质特点及在沥青混合料中的应用现状[J].石油沥青,2017,31(3):54-59,72.
- [11] 刘栋,李立寒,崔华杰.水泥稳定炉渣碎石基层路用性能[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(3):405-409,415.
- [12] 李伟雄,张肖宁.水泥稳定碎石集料级配变异对无侧限抗压强度的影响[J].中外公路.2011,31(1):213-216.
- [13] JTG E20—2005,公路工程集料试验规程[S].
- [14] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

(上接第169页)

实施提供了保障。

(2)在试验中,采用指定产地的产品材料,水泥采用的是南京海螺水泥有限公司生产的海螺牌P·042.5级普通硅酸盐水泥,粉煤灰选用常州Ⅱ级粉煤灰,硅粉购自常州航艇,耐碱玻璃纤维产自河南永兴,由于不同产地产品,其性质并不一定相同,甚至差异很大,因而具体推广应用时,应在试验的基础上,进一步调整适宜的配合比。

(3)优选结果假定混凝土试块的强度、容重对试验结果的影响重要性比值为1:1,如改变两者的重要性比值,则相应结果可能随之改变。

(4)通过综合平衡法确定最优配合比,其最优结果刚好为6号试验,但往往大量工程试验中最优配合比并不一定刚好位于已发生试验中。此时,尚需根据所分析的最优配合比结果重新试验,并与已知试

验结果进行比对,进一步判断优化结果的合理性。

参考文献:

- [1] 高彦彦编.正交及回归试验设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [2] 种迅,王子杨,蒋庆,等.玻璃纤维复材筋拉结预制混凝土夹芯墙板平面外抗弯性能研究[J].工业建筑,2017,47(7):40-46.
- [3] 李耀,隋杰英,赵晗竹.耐碱玻璃纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J].青岛理工大学学报,2019,40(5):37-43.
- [4] 王晖.耐碱玻璃纤维混凝土力学性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [5] 赵文辉,苏谦,李婷,等.玻璃纤维增强泡沫轻质混凝土力学性能的试验研究[J].工业建筑,2017,47(9):110-114+80.
- [6] 陈猛,白帅,张海鹏,等.混杂纤维混凝土抗压和抗拉性能试验研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(10):113-117.
- [7] 沈武,杨鼎宜,骆静静,等.耐碱玻璃纤维混凝土的长期力学性能研究[J].混凝土,2017(6):102-106.
- [8] 肖红玉.水保工程中玻璃纤维对再生混凝土性能的影响研究[J].广东水利水电,2019(11):71-74.